



**Marco Antonio  
Passarelli**

**QAI e Eficiência Energética. O dilema da  
concentração de CO<sub>2</sub> em edifícios**



**Marco Antonio  
Passarelli**

**QAI e Eficiência Energética. O dilema da  
concentração de CO<sub>2</sub> em edifícios**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor António João de Melo Martins de Araújo, assistente convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e co-orientação do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, irmão e irmã

## **o júri**

presidente

**Doutor Luís António da Cruz Tarelho**

Professor auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Doutora Teresa Filomena Vieira Nunes**

Professora associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Doutor Nelson Amadeu Dias Martins**

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

**Doutor António João de Melo Martins de Araújo**

Assistente convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

O trabalho resultante está aqui e deve muito, ao meu orientador, Prof. António Araújo, a quem venho exprimir publicamente os meus agradecimentos e também a expressão da minha estima e do meu respeito. Também gostaria de agradecer o meu co-orientador, Prof. Nelson Martins pelos saberes, segurança e conhecimento que me transmitiu.

A Cátia por todo o carinho, ajuda, motivação e encorajamento que me transmitiu para terminar esta etapa.

Aos meus pais por dedicarem as suas vidas ao estudo dos filhos.

Quero agradecer todos os amigos que apoiaram e me incentivaram na realização deste trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento.

## palavras-chave

Ventilação, edifícios, caudais mínimos de ar novo, necessidades energéticas, eficiência energética, CO<sub>2</sub>.

## resumo

A Directiva Europeia sobre o desempenho energético dos edifícios especifica diversos requisitos para a poupança de energia em edifícios, sem a negligência do conforto dos ocupantes. A regulamentação Portuguesa na área da térmica de edifícios e qualidade do ar interior (RSECE, Decreto-Lei 79/2006 de 4 de Abril), decorrente da transposição da Directiva, veio incrementar os níveis de exigência relativamente ao comportamento higrotérmico da envolvente dos edifícios e as condições de ventilação do ar interior.

A ventilação nos edifícios, através da troca do ar ambiente interior pelo ar exterior, é uma das alternativas para resolver os problemas relacionados com qualidade do ar interior. Entretanto, os requerimentos de ventilação, pela recomendação de caudais mínimos de ar novo, podem estar em conflito com os requerimentos energéticos, devido ao facto da renovação do ar exigir energia para o seu condicionamento e para a manutenção das condições de conforto interiores.

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de simulação que permitiu analisar a evolução temporal da concentração de CO<sub>2</sub> metabólico diária, pelo balanço mássico de CO<sub>2</sub> no interior de edifícios de serviços, tendo como variável o caudal de insuflação de ar novo e o perfil de ocupação humana.

Os caudais de ar novo, utilizados nas simulações, foram calculados conforme as quatro estratégias de ventilação propostas, as quais seguem critérios normativos ou não. Para melhores resultados e efeitos comparativos, simularam-se dois casos de estudo teóricos com actividades metabólicas distintas, que representam um ginásio e um escritório, em três climas Portugueses.

Concluiu-se que no caso do sistema de ventilação ser projectado pelos caudais mínimos normativos prescritivos estes tanto podem ser exagerados, resultando na hiperventilação e no consequentemente consumo excessivo de energia como podem ser insuficientes para eliminar o CO<sub>2</sub> metabólico a níveis de referência aceitáveis, particularmente em edifícios com actividade metabólica média e alta. As simulações realizadas indicaram a relevância do aquecimento, como principal necessidade energética para o condicionamento do ar interior, para as condições de conforto desejadas, devido somente à renovação do ar interior, em climas Portugueses, sem levar em consideração outros factores e suas influências no balanço higrotérmico do edifício.

**keywords**

Ventilation, buildings, minimum outdoor airflow, energy needs, energy efficiency, CO<sub>2</sub>.

**abstract**

The European Energy Performance of Buildings Directive specifies various requirements for energy saving in buildings, without the negligence of occupant comfort. The Portuguese legislation (RSECE) in the buildings thermal area and indoor air quality resulting from the transposition of the Directive has increased the demand levels for the hygrothermal behavior of the building envelope and the conditions of air indoor ventilation.

Ventilation in buildings, changing the indoor air by outdoor air is an alternative to solve the problems associated with indoor air quality. However, the requirements for ventilation, by recommendation of minimum outdoor rate, may conflict with energy requirements, because air changes require energy for its conditioning and the comfort interior conditions maintenance.

In this work was developed a simulation tool that allowed the analysis of temporal evolution of daily metabolic CO<sub>2</sub> concentration, by CO<sub>2</sub> mass balance, in services buildings, with the variable outdoor airflow and the profile of human occupation.

The outdoor airflow used in the simulations was calculated according to the four ventilation strategies proposals, which followed or not the normative criteria. For better results and comparative purposes, it was theoretically simulated two study cases with different metabolic activities, which represent a gymnasium and an office building in three different Portuguese climates.

It was concluded that ventilation systems designed for minimum outdoor airflow normative prescriptive may be exaggerated, resulting in hyperventilation and the consequent excessive energy consumption, but also may not be sufficient to eliminate the metabolic CO<sub>2</sub> to acceptable reference levels, particularly in buildings with medium and high metabolic activity. The simulations indicated the importance of heating as the primary energy requirement for conditioning the indoor air to the desired comfort conditions due only to the renewal of the indoor air, in Portuguese climate, without taking into account other factors and their influence on the building hygrothermal balance.

# Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Objectivos.....	3
1.2	Formulação do problema.....	4
1.3	Contributo da dissertação.....	4
1.4	Organização da dissertação.....	5
2	Revisão Bibliográfica.....	7
2.1	Enquadramento.....	7
2.2	A Qualidade do ambiente interior.....	7
2.3	A Qualidade do ar interior.....	8
2.3.1	Síndrome do edifício doente.....	8
2.3.2	Poluição do ambiente interior.....	9
2.3.3	Evolução temporal da concentração de um poluente.....	11
2.3.4	Valores limites de concentrações de poluentes.....	12
2.3.5	Melhorar a QAI nos edifícios.....	13
2.3.6	Conforto higrotérmico.....	14
2.4	Ventilação.....	15
2.4.1	Tipos de ventilação.....	15
2.4.2	Sistemas AVAC e seus componentes.....	16
2.4.3	Análise da QAI através do CO <sub>2</sub> .....	18
2.4.4	Produção de CO <sub>2</sub> pelas pessoas.....	19
2.4.5	Taxa de renovação de ar por hora.....	21
2.4.6	Exigências RSECE.....	22
2.4.7	Exigências ASHRAE.....	24
2.4.7.1	<i>Ventilation Rate Procedure</i> .....	25
2.4.7.2	Ventilação controlada pela demanda.....	26
2.5	Classificação de ambientes interiores.....	27
2.6	Consumo energético resultante da renovação do ar.....	29
2.6.1	Calor sensível.....	29
2.6.2	Calor latente.....	30
2.7	Conforto ambiental vs. poupança energética.....	32
2.8	Considerações finais.....	32



3	Metodologia.....	35
3.1	Ferramenta de simulação.....	35
3.1.1	Cálculo da concentração de CO <sub>2</sub> no interior .....	38
3.1.2	Estratégias de ventilação.....	40
3.1.2.1	Estratégia UT (utilizador) .....	41
3.1.2.2	Estratégia RS (RSECE) .....	42
3.1.2.3	Estratégia AS (ASHRAE) .....	42
3.1.2.4	Estratégia OP (otimizado).....	43
3.1.3	Cálculo da energia requerida associada à ventilação.....	43
3.1.3.1	Carga térmica para aquecimento e arrefecimento.....	43
3.1.3.2	Carga térmica para humidificação e desumidificação .....	44
3.2	Considerações finais.....	46
4	Casos de estudo.....	47
4.1	Geometria e perfil de utilização.....	47
4.2	Perfil de ocupação.....	48
4.3	Zonas climáticas.....	49
4.4	Caudal de ar novo mínimo e período de ventilação .....	50
4.5	Parâmetros comuns.....	51
5	Resultados e discussão .....	53
5.1	Avaliação de <b>Ci</b> e do caudal de ar novo.....	53
5.1.1	Caso 1 – Ginásio .....	54
5.1.2	Caso 2 - Escritório .....	56
5.2	Avaliação energética.....	58
5.2.1	Necessidades energéticas em Bragança .....	59
5.2.2	Necessidades energéticas em Aveiro .....	60
5.2.3	Necessidades energéticas em Évora .....	61
5.3	Análise comparativa dos casos de estudo.....	63
5.4	Considerações finais.....	64
6	Conclusões e perspectivas futuras .....	69
6.1	Propostas para trabalhos futuros.....	71
	Bibliografia e referências .....	73
	Anexo 1 - Comparação de regulamentos e guias pertinentes ao ambiente interior [16] .....	77
	Anexo 2 - Concentração de interesse de contaminantes seleccionados [16].....	78

Anexo 3 - Taxas de ventilação mínimas na zona respirável [16].....	81
Anexo 4 - Eficácia da distribuição do ar na zona [16] .....	84
Anexo 5 - Padrões de referência de utilização de edifícios [2] .....	85
Anexo 6 - Necessidades energéticas mensais simuladas .....	87

## Índice de Figuras

Figura 1 - Relação conceptual entre a QAI, ventilação e eficiência energética. ....	2
Figura 2 - Factores que influenciam a qualidade ambiental interior [13]. ....	7
Figura 3 - Representação esquemática dos factores que afectam a qualidade do ar no interior [20] .....	10
Figura 4 - Espaço monozona com fonte poluente e purificador de ar interior [22]. ....	11
Figura 5 - Representação dos componentes típicos do sistema AVAC [29]. ....	17
Figura 6 - Consumo de O <sub>2</sub> e produção de CO <sub>2</sub> em função da actividade física [16]. ....	20
Figura 7 - Exemplo de uma estratégia de ventilação DCV [39]. ....	27
Figura 8- Janela inicial do programa de simulação .....	35
Figura 9 - Exemplo do perfil de ocupação. ....	37
Figura 10 - Exemplo de um gráfico das necessidades energéticas mensais num ano. ....	37
Figura 11 - Diagrama do balanço de massa do CO <sub>2</sub> [47]. ....	38
Figura 12 - Organograma do cálculo da <b>Ci</b> . ....	39
Figura 13 - Representação das tipologias em 3D. ....	47
Figura 14 – Perfil de Ocupação dos casos de estudo .....	49
Figura 15 - Concentração interior de CO <sub>2</sub> para o caso de estudo 1. ....	54
Figura 16 - Caudal de ar novo para o caso de estudo 1. ....	55
Figura 17 - Concentração interior de CO <sub>2</sub> para o caso de estudo 2. ....	56
Figura 18 - Caudal de ar novo para o caso de estudo 2. ....	57
Figura 19 - Necessidades energéticas anuais para Bragança. ....	59
Figura 20 - Necessidades energéticas anuais para Aveiro. ....	60
Figura 21 - Necessidades energéticas anuais para Évora. ....	61
Figura 22 - Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para o caso de estudo 2 com a estratégia de ventilação UT. ....	62

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Factores e fontes que afectam a qualidade do ar interior e o conforto. ....	9
Tabela 2 - Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios existentes estabelecidas no RSECE.....	13
Tabela 3 - Caudais mínimos de ar novo estabelecidos no RSECE. ....	23
Tabela 4 - Descrição da aplicabilidade das categorias .....	27
Tabela 5 - Exemplos das concentrações de CO <sub>2</sub> recomendadas acima das concentrações exteriores para o cálculo de energético e controlo da procura. ....	28
Tabela 6 - Taxas de ventilação recomendadas para a diluição dos bioefluentes emitidos pelas pessoas para diferentes categorias [13]. ....	28
Tabela 7- Taxas de ventilação recomendadas para escritórios <i>landscaped</i> com uma densidade de ocupação por defeito para três categorias de poluição provenientes do próprio edifício [40]. ....	29
Tabela 8 - Campos de introdução numérica de dados da ferramenta de simulação. ....	36
Tabela 9 - Parâmetros de entrada e seus respectivos valores adoptados nos casos de estudo. ....	48
Tabela 10 - Distribuição dos concelhos de Portugal continental segundo as zonas climáticas e correspondentes dados climáticos de referência [10].....	50
Tabela 11 - Caudais mínimos de ar novo adoptados nos casos de estudo.....	50
Tabela 12 - Síntese dos resultados encontrados para os casos 1 e 2 no concelho de Bragança.....	63
Tabela 13 – Comparação de resultados para o caso 2 com estratégia UT e UT <sub>-2,5x</sub> .....	65
Tabela 14 - Tipo de actividade e respectiva taxa metabólica. ....	67

## Abreviaturas

ADENE	Agência para Energia
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar-condicionado
CAV	Constant air volume
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
CSH	Code for Sustainable Homes
DCV	Demand controlled ventilation
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
EPA	Environment Protection Agency
EPBD	Energy Performance of Building Directive
GEE	Gases com efeito de estufa (GHC – Greenhouse Gases)
IAQ	Indoor Air Quality
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
OMS	Organização Mundial da Saúde
QAI	Qualidade do ar interior
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RQSECE	Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios
SED	Síndrome do edifício doente
UA	Universidade de Aveiro
UE	União Europeia
UTA	Unidade de tratamento do ar
VRP	Ventilation rate procedure

## Nomenclatura

$A$	área útil de pavimento	(m <sup>2</sup> )
$A_{Du}$	área da superfície do corpo (área de DuBois)	(m <sup>2</sup> )
$C$	concentração média instantânea do poluente	(mg/m <sup>3</sup> )
$C_0$	concentração de CO <sub>2</sub> interior no instante $t = 0$ s	(ppm)
$C_e$	concentração de CO <sub>2</sub> no exterior	(ppm)
$C_{ext}$	Concentração do poluente no exterior	(mg/m <sup>3</sup> )
$C_{i,excesso}$	concentração excedida média de CO <sub>2</sub>	(mg/m <sup>3</sup> )
$C_i$	concentração de CO <sub>2</sub> no interior	(ppm)
$C_{lim}$	concentração de CO <sub>2</sub> limite admissível	(ppm)
$c_p$	calor específico do ar	( J/kg. °C)
$E_f$	eficácia da distribuição de ar	-
$G$	geração de poluente no interior do compartimento	(mg/h)
$HR_{máx}$	humidade relativa máxima adoptada	-
$HR_{mín}$	humidade relativa mínima adoptada	-
$M$	taxa metabólica	(met)
$M_a$	massa de ar seco da mistura	(kg de ar seco)
$M_w$	massa de vapor de água	(kg de H <sub>2</sub> O)
$N$	número de pessoas	(pessoas)
$N_{máx}$	população máxima da zona	(pessoas)
$P_a$	pressão parcial do ar seco	(Pa)
$P_{atm}$	pressão atmosférica	(Pa)
$P_{caudal}$	percentagem horária de caudal de ar novo em relação ao	-
$P_{ocup}$	percentagem horária de ocupantes em relação ao número	-
$P_{s,int}$	pressão de saturação de vapor de água no interior	(Pa)
$P_{w,máx}$	pressão parcial de vapor máxima no interior	(Pa )
$P_{w,mín}$	pressão parcial de vapor mínima no interior	(Pa )
$P_w$	pressão parcial do vapor de água	(Pa)
$Q$	caudal de ar de renovação	(m <sup>3</sup> /s)

$Q_{ac}$	caudal através do purificador de ar	(m <sup>3</sup> /h)
$Q_{\text{área}}$	caudal mínimo de ar novo requerido por área	(m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> )
$Q_{bz}$	caudal mínimo de ar novo requerido na zona de respiração	(l/s)
$Q_{nec}$	caudal de ar novo necessário para atender um limite de CO <sub>2</sub>	(m <sup>3</sup> /h)
$Q_p$	caudal mínimo de ar novo requerido por pessoa	(m <sup>3</sup> /h.pessoa)
$R_a$	constante própria do gás ar	(J/kg.K )
$R_w$	constante própria do gás vapor de água	(J/kg.K )
$S$	caudal da fonte emissora de poluente	(m <sup>3</sup> /s)
$S_p$	produção de CO <sub>2</sub> por pessoa	(m <sup>3</sup> /s)
$S_{up}$	superfície de deposição	(m <sup>2</sup> )
$t$	tempo	(s)
$V$	volume da zona	(m <sup>3</sup> )
$V_{O_2}$	consumo de oxigénio	(l/s.pessoa)
$W$	teor de humidade do ar húmido	(kg de vapor de água/kg de ar seco)
$W_{ext}$	teor de humidade do ar exterior	(kg de vapor de água/kg de ar seco)
$W_{int}$	teor de humidade do ar interior	(kg de vapor de água/kg de ar seco)
$W_{m\acute{a}x}$	teor de humidade interior máximo	(kg de vapor de água/kg de ar seco)
$W_{m\acute{i}n}$	teor de humidade interior mínimo	(kg de vapor de água/kg de ar seco)
$\Delta W$	diferença entre o teor de humidade do ar interior e exterior	(kg de vapor de água/kg de ar seco)
$\Delta T$	diferença entre a temperatura interior e exterior	(°C)
$v_d$	velocidade de deposição do poluente	(mg/h/m <sup>2</sup> )
$\varepsilon_{ac}$	eficiência do purificador de ar	-
$\lambda_v$	taxa de renovação	(h <sup>-1</sup> )
$\lambda_v$	taxa nominal de troca de ar	(h <sup>-1</sup> )
$\rho$	densidade do ar	(kg/ m <sup>3</sup> )

## 1 Introdução

O fenómeno das alterações climáticas tem provocado um aumento da temperatura da superfície terrestre, evidente a partir de observações como o aumento da temperatura média global do ar e dos oceanos, o degelo generalizado e o aumento médio global do nível do mar. O clima sempre variou em função de causas naturais, no entanto esse problema tem vindo a agravar-se consideravelmente, como demonstrado pela tendência de aquecimento. Onze, dos últimos doze anos (1995 – 2006) estão entre os mais quentes nos registos instrumentais da temperatura da superfície terrestre (desde 1850) [1]. As causas naturais explicam apenas uma pequena parte deste fenómeno; para muitos cientistas, o aquecimento deve-se, maioritariamente, a crescentes concentrações de gases de efeito de estufa (GEE), que conservam o calor na atmosfera, e são causados pela actividade humana.

A actividade humana acentua-se nas cidades, onde actualmente vive metade da população mundial e cujo número tende a aumentar. Nas cidades encontram-se os edifícios, grandes consumidores da energia de um país, o que indica que as cidades e o consumo de energia associado aos edifícios é um dos temas cruciais da actualidade. No contexto internacional, é consensual a necessidade de melhorar a qualidade dos edifícios e de reduzir os consumos de energia e correspondentes emissões de GEE, sem comprometer o conforto no seu interior [2].

Na União Europeia, o sector residencial e terciário, a maior parte do qual é constituído por edifícios, absorve mais de 40 % do consumo final de energia [3]. Em Portugal, o sector residencial e de serviços é responsável pelo consumo de 29 % da energia final [4]. Os sistemas de climatização (aquecimento e arrefecimento) e iluminação são os principais responsáveis pelo consumo de energia em edifícios de serviços, devido à influência dos projectos arquitectónicos, das especificações de materiais e das condições actuais do uso da edificação, associado às exigências de conforto térmico e visual em espaços interiores [5].

A primeira regulamentação portuguesa no sector, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)[6], entrou em vigor no início de 1991. O objectivo desse Regulamento foi melhorar as condições de conforto no interior dos edifícios, restringindo o gasto excessivo de energia. No ano de 1992, surgiu o Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RQSECE) [7] e, em 1998, o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) [8], nos quais foram estabelecidas exigências de concepção e instalação de sistemas, tendo em vista a sua racionalização energética.



---

A Directiva Europeia 2002/91/CE, *Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings* (EPBD) [3], estabeleceu uma série de requisitos com o objectivo de promover a melhoria do desempenho energético e, desta forma, atender aos compromissos assumidos no Protocolo de Quioto. Após a transposição da Directiva Europeia 2002/91/CE entrou em vigor, em 2006, o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) [9] e tanto o RSECE [2] quanto o RCCTE foram revistos [10], respeitando os decretos-lei 78/2006, 79/2006 e 80/2006, respectivamente. Neste novo pacote de regulamentos, para além do enfoque energético, a qualidade do ar ganhou significativa expressão em Portugal.

A preocupação com a problemática da qualidade do ar interior (QAI) em edifícios está relacionada com a exposição das pessoas à acção de uma variedade de poluentes nele existentes, com efeitos graves na saúde<sup>1</sup>. Para além disso, pode afectar também os padrões de comportamento dos ocupantes, com reflexos significativos no seu bem-estar e produtividade. O controlo da QAI no interior dos edifícios é, deste modo, um problema de saúde pública que importa solucionar, em benefício dos seus ocupantes [11].

A ventilação nos edifícios através da troca do ar ambiente interior pelo ar exterior (ar novo) é uma das alternativas para resolver os problemas relacionados com a QAI. Entretanto, os requerimentos de ventilação podem estar em conflito com os requerimentos de energia. Isso deve-se ao facto da renovação do ar exigir energia para o seu condicionamento e para a manutenção das condições de conforto interiores.



**Figura 1 - Relação conceptual entre a QAI, ventilação e eficiência energética.**

A eficiência energética e as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) estão incorporados numa secção obrigatória de requisitos mínimos a ser cumpridos nas novas habitações e são o foco

---

<sup>1</sup> ex: doenças respiratórias, hipersensibilidade a agentes alergénicos, doenças crónicas associadas, etc.

principal do Código de Habitações Sustentáveis, *Code for Sustainable homes* (CSH) [12]. O CSH é a base das futuras normas de construção sustentável no sector da habitação no Reino Unido, pois incorpora, para além da energia e do CO<sub>2</sub>, outras sete palavras-chave de sustentabilidade (ex: uso racional de água, bem-estar dos ocupantes, gestão de resíduos, etc.).

A construção sustentável é definida como um sistema construtivo que promove alterações conscientes no entorno, de forma a atender às necessidades de edificação e ao uso do homem moderno, preservando o meio ambiente e os recursos naturais. Os edifícios sustentáveis são aqueles que proporcionam um ambiente saudável e adequado a todos os seus ocupantes, tendo em vista a satisfação das suas necessidades, sem prejudicar a capacidade dos sistemas ambientais de satisfazerem as necessidades das gerações futuras.

A nova Directiva Europeia 2010/31/EU, direccionada para os edifícios, substitui a revogada 2002/91/CE e impõe maiores exigências e requisitos mínimos para edifícios, os quais deverão ser ainda mais eficientes em energia. As remodelações de edifícios existentes e os novos edifícios deverão ter em conta estes novos parâmetros de sustentabilidade, conseguidos a nível ecológico, económico, social e cultural. Os novos edifícios deverão ser *nearly zero-energy*, ou seja, terão de ser projectados para atingir um nível de eficiência energética muito elevado, com vista a alcançar o equilíbrio óptimo de rentabilidade entre os investimentos envolvidos e os custos de energia ao longo do ciclo de vida do edifício. Além disso, os edifícios deverão ser promotores das energias renováveis, as quais deverão ser produzidas localmente.

O verdadeiro desafio para edifícios sustentáveis é o equilíbrio entre a optimização de um ambiente interior que promove a saúde e o bem-estar dos ocupantes, e a utilização de energia e emissão de GEE associados à manutenção das condições desse ambiente.

### 1.1 Objectivos

Tendo em conta as necessidades da QAI e de eficiência energética associadas às novas directivas e consequentes regulamentos voltados aos edifícios, o objectivo principal deste trabalho centra-se na análise da evolução temporal da concentração de CO<sub>2</sub> metabólico no interior de edifícios de serviços, tendo como variável o caudal de insuflação de ar novo e perfil de ocupação humana. Por outro lado, e de modo a manter as condições de conforto no ambiente interior (temperatura e humidade relativa do ar), pretende-se avaliar a energia requerida associada à renovação do ar interior. Foi desenvolvido no âmbito deste estudo uma

---

ferramenta de simulação, testada para dois casos de estudo diferentes, com resultados apresentados para três climas distintos de Portugal.

Como objectivo específico, pretende-se calcular o caudal de ar novo para um determinado perfil de ocupação, utilizando diferentes critérios de ventilação, normativos ou não.

## **1.2 Formulação do problema**

A maioria das normas relativas ao controle de QAI exige uma quantidade predefinida de ar novo por pessoa, também denominado taxa de renovação de ar ou caudal mínimo de ar novo por pessoa, normalmente indicado em função da tipologia de utilização do espaço. O cálculo do caudal de ar novo a ser insuflado no edifício é geralmente baseado nesta taxa de renovação mínima com a ocupação máxima prevista na fase de projecto.

Actualmente, em Portugal, segundo o regulamento vigente para edifícios de serviços (RSECE), a fixação dos requisitos de ventilação é puramente prescritiva e não permite a utilização de métodos analíticos de cálculo do caudal de ar novo. A possibilidade de cálculo analítico já é tida em conta em normas internacionais, como no caso da norma americana (ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), desde que se atenda a alguns requisitos como o conhecimento das fontes emissoras de poluentes.

A existência de requisitos mínimos para o dimensionamento de sistemas de ventilação, prescritivos pelo RSECE, gera algumas dúvidas relacionadas com a QAI e com o aumento do consumo de energia, principalmente pela “hiperventilação”, quando o edifício é ocupado com uma taxa inferior à definida no projecto.

## **1.3 Contributo da dissertação**

Avaliando a influência que a renovação de ar novo tem na evolução das concentrações de CO<sub>2</sub> em determinadas condições (tipologia, ocupação, etc.) e nas necessidades energéticas para as condições de conforto no ambiente interior, espera-se obter resultados que possam contribuir para decisões futuras no âmbito da eficiência energética e melhoria das condições de conforto interiores de edificações.

No presente trabalho, através da investigação e comparação do actual regulamento Português com a norma Americana e outras referências internacionais recentes relacionadas com a QAI,

ambiciona-se formular propostas que venham contribuir para o processo de revisão do actual RSECE-QAI.

Pretende-se ainda desenvolver uma ferramenta, que de uma maneira simples e rápida possa servir de referência para a programação da operação de sistemas de ventilação existentes e também no auxílio do dimensionamento da ventilação de novos edifícios, em algumas circunstâncias, tendo o CO<sub>2</sub> como indicador da QAI.

### **1.4 Organização da dissertação**

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta uma breve introdução sobre os actuais problemas associados à actividade humana, o enquadramento do consumo energético nas edificações e a implementação de regulamentos que contribuam para a melhoria dos ambientes interiores, finalizando com os objectivos do estudo, formulação do problema e o contributo da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, que evidencia a importância da qualidade do ar interior, e a introdução de normas e conceitos relacionados com a ventilação.

No terceiro capítulo, é descrita a metodologia seguida, a ferramenta de simulação desenvolvida neste trabalho, as diferentes estratégias de ventilação para a renovação do ar e os pressupostos do estudo.

Os casos de estudo teóricos, tipologias das edificações adoptadas e parâmetros de interesse utilizados na pesquisa, são apresentados no quarto capítulo.

No quinto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados encontrados na análise do desempenho energético e do nível de concentração de CO<sub>2</sub> no interior, referentes à influência da ventilação dos casos de estudo propostos.

No último capítulo, são expostas as conclusões do estudo e as recomendações para trabalhos futuros.

---

## 2 Revisão Bibliográfica

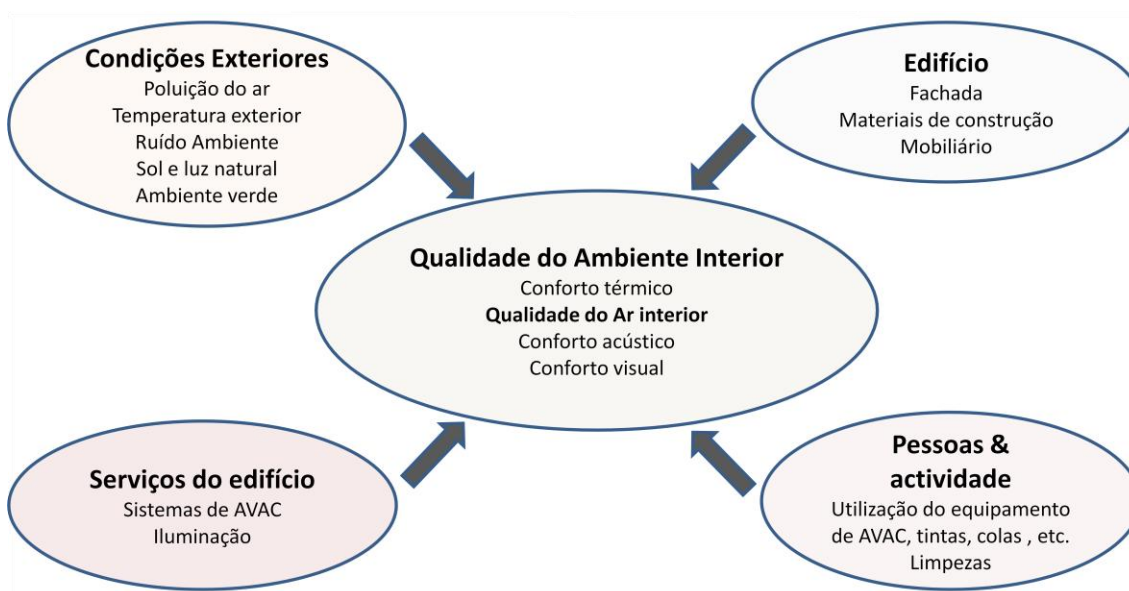
### 2.1 Enquadramento

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica abordando a temática da qualidade do ar interior e a sua relação com a eficiência energética de edifícios através da ventilação. São apresentadas também algumas normas nacionais e internacionais elaboradas nesse contexto.

### 2.2 A Qualidade do ambiente interior

O aumento do tempo de permanência em edifícios e as novas práticas construtivas, geradoras de potenciais deficiências de carácter higrotérmico, têm vindo a provocar um crescente interesse e preocupação com a qualidade do ambiente interior de edifícios. A regulamentação portuguesa na área da térmica de edifícios e qualidade do ar veio incrementar os níveis de exigência relativamente ao comportamento higrotérmico da envolvente dos edifícios e as condições de ventilação do ar interior.

A qualidade ambiental interior está relacionada com a co-existência do conforto térmico, conforto visual, qualidade do ar interior e conforto acústico [13].



**Figura 2 - Factores que influenciam a qualidade ambiental interior [13].**

---

Como se constata na Figura 2, a qualidade ambiental interior depende de vários factores. Esses factores ambientais interiores afectam o consumo energético de um edifício e, por essa mesma razão o interesse na avaliação e no projecto destes factores tem vindo a aumentar.

## **2.3 A Qualidade do ar interior**

A QAI diz respeito à qualidade do ar de dentro dos edifícios e estruturas prediais, especificamente na saúde e no conforto dos ocupantes. A saúde ambiental interior compreende aspectos da saúde humana e doenças que são determinados por factores no ambiente interior. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) [14], os vários problemas da QAI são reconhecidos como importantes factores de risco no que diz respeito a saúde humana, tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento. A prática da saúde do ambiente interior requer a consideração de perigos químicos, biológicos, físicos e ergonómicos [15].

De acordo com a ASHRAE [16], a qualidade do ar pode ser aceitável se no ar interior não se verificam contaminantes em concentrações nocivas, de acordo com o determinado por autoridades reconhecidas, e se uma maioria substancial das pessoas expostas (mais que 80%) a um determinado ar interior não apresenta desagrado em relação as condições do ambiente interior. Uma boa QAI é tida como um dos parâmetros que mais contribui para a produtividade, conforto, saúde e bem-estar, enquanto, uma deficiente QAI nos edifícios pode causar uma síndrome conhecida como síndrome do edifício doente (SED).

### **2.3.1 Síndrome do edifício doente**

O termo SED é usado para descrever situações de desconforto e/ou problemas de saúde que estão relacionados com a permanência humana no interior de alguns edifícios. Muitas vezes não é possível estabelecer-se qualquer diagnóstico específico ou identificar-se as eventuais causas do desconforto/problema de saúde. Queixas como dores de cabeça, náuseas, fadiga, sonolência, irritação dos olhos, nariz, garganta, etc., podem estar relacionadas com um compartimento ou área específica, ou com a totalidade do edifício. Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), as causas das queixas dos ocupantes são multi-factoriais e muitas vezes psicológicas [17].

Um dos factores que potencializa esse problema é a estanqueidade dos novos edifícios, os quais são mais isolados termicamente, com permeabilidade do ar reduzida, comandados pelo

factor energia (eficiência energética), através da redução dos fenómenos de transferência de calor da sua envolvente com o meio exterior. O aumento dos isolamentos térmicos é uma tendência focada em países com climas frios, onde as perdas de calor para o exterior são grandes. Muitas vezes, a prevalência de sintomas de SED é maior em edifícios com ar-condicionado do que em edifícios ventilados naturalmente, e estão associados com as características dos sistemas de ventilação [18]. De notar que ao tratar da poluição do ar interior se exclui os casos da chamada higiene industrial em que a poluição num dado local ou espaço interior é devida à produção ou manipulação industrial.

### 2.3.2 Poluição do ambiente interior

O resultado da interacção da localização, do clima, do sistema de ventilação, das fontes de contaminação, do número de ocupantes e do tempo de ocupação do edifício formam o ar do ambiente interior. Alguns destes factores e fontes estão listados na Tabela 1 [17].

**Tabela 1 - Factores e fontes que afectam a qualidade do ar interior e o conforto.**

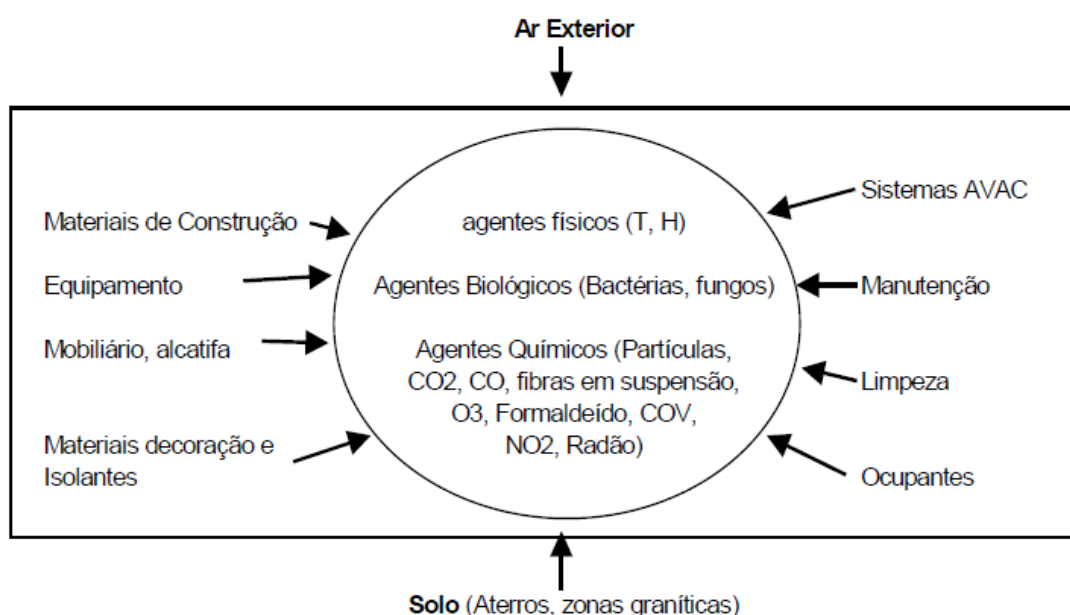
<b>Factor</b>	<b>Fonte</b>
Temperatura e valores extremos de humidade	Colocação imprópria dos dispositivos de medição (termóstatos), deficiente controlo de humidade, incapacidade do edifício de compensar extremos climáticos, número de equipamentos instalados e a densidade de ocupação.
Dióxido de carbono	Número de pessoas, queima de combustíveis fósseis (gás, aquecedores, etc.).
Monóxido de carbono	Emissões de veículos (garagens, entrada de ar), combustão, fumo do tabaco.
Formaldeído	Madeira prensada, contraplacado não selado, isolamento de espuma de ureia, tecidos, cola, carpetes, mobiliário, papel químico.
Partículas	Fumo, entradas de ar, papel, isolamento de tubagens, resíduos de água, carpetes, filtros de AVAC, limpezas.
Compostos orgânicos voláteis	Fotocopiadoras e impressoras, computadores, carpetes, mobiliário, produtos de limpeza, fumo, tintas, adesivos, calafetagem, perfumes, laca, solventes.
Ventilação inadequada (ar exterior insuficiente, deficiente circulação)	Medidas de poupança de energia e manutenção, má concepção do projecto do sistema AVAC, operação deficiente de funcionamento, alteração de funcionamento do AVAC pelos ocupantes, concepção desajustada dos espaços em avaliação.
Matéria microbiana	Água estagnada em sistema AVAC, materiais molhados e húmidos, desumidificadores, condensadores das torres de resfriamento ( <i>chillers</i> ), torres de refrigeração.



A concentração local de poluentes depende de factores como [19]:

- Taxa de emissão;
- Caudal de ar novo;
- Características do ar novo/concentração de poluentes no ar exterior;
- Sistemas de ventilação;
- Características do compartimento (dimensões geométricas, tipos de revestimento e mobiliário).

A Figura 3 ilustra os principais factores e agentes que afectam a QAI.



**Figura 3 - Representação esquemática dos factores que afectam a qualidade do ar no interior [20]**

Os efeitos dos poluentes na saúde humana podem ser denominados como:

- Efeitos incomodativos – odores desagradáveis (após 5 a 60 min de exposição), reacções de irritação dos olhos, nariz, garganta e boca;
- Efeitos agudos – imediatos;
- Efeitos prolongados – reacções alérgicas ou infecciosas, cancro do pulmão.

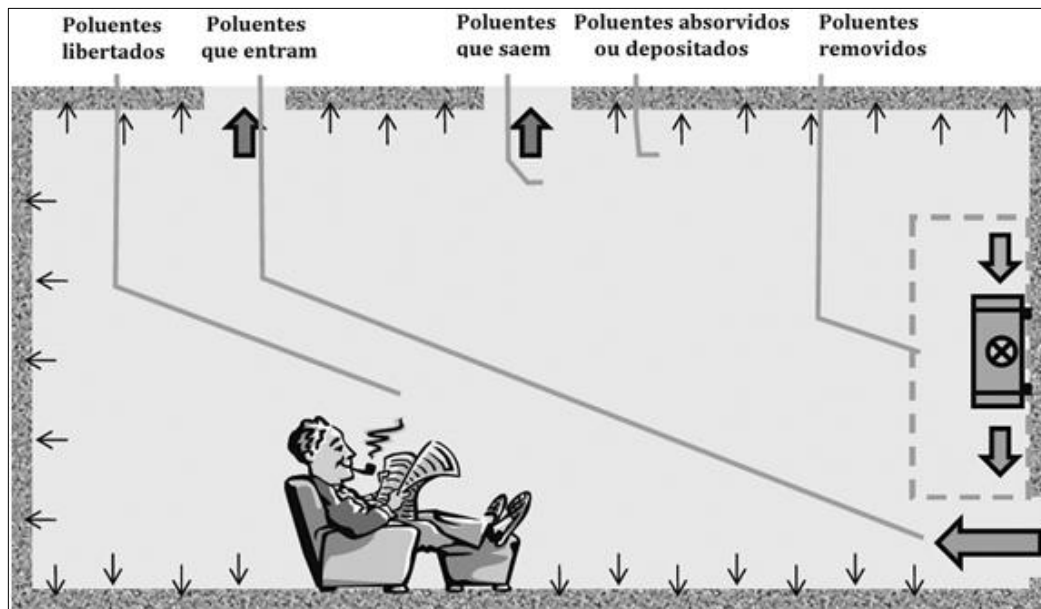
Perante esta situação, a avaliação da qualidade do ar interior num edifício é um problema complexo mas de elevada pertinência, dado que está em causa a saúde dos ocupantes.

Um factor relevante na poluição do ar interior é a humidade. O desenvolvimento de agentes biológicos no ar interior é atribuído à humidade e à ventilação deficiente [17]. O excesso de humidade provoca o crescimento de fungos e bactérias, os quais degradam os materiais e emitem para o ar interior esporos, células, fragmentos e compostos orgânicos voláteis (COV), que são prejudiciais a saúde.

No processo de verificação da conformidade regulamentar (RSECE – vertente QAI) em Portugal, num universo de mais de 200 edifícios de serviços, encontrou-se um alto número de inconformidades legais ao nível dos microrganismos (90 %), com especial ênfase para as bactérias, e outras inconformidades sistemáticas ao nível dos COV's (15 %) e do CO<sub>2</sub> noutras (75 %) do total de edifícios auditados [21].

### 2.3.3 Evolução temporal da concentração de um poluente

Formulou-se matematicamente a evolução temporal da concentração de um poluente, considerando um espaço monozona (uma zona térmica), que efectua trocas gasosas com o exterior, e que no ambiente interior possui uma fonte poluente e um elemento de purificação do ar (Figura 4).



**Figura 4 - Espaço monozona com fonte poluente e purificador de ar interior [22].**

Admitindo a possibilidade de absorção ou deposição do poluente nas paredes e superfícies interiores, pode-se formular a evolução temporal da concentração média de um poluente através da seguinte equação diferencial [22]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{G}{V} + \lambda_v C_{\text{ext}} - \lambda_v C(t) - v_d \frac{S_{\text{up}}}{V} C(t) - \frac{Q_{\text{ac}}}{V} C \varepsilon_{\text{ac}} \quad (1)$$

onde:

- $C$  = concentração média instantânea do poluente ( $\text{mg}/\text{m}^3$ );
- $t$  = tempo (s);
- $G$  = geração de poluente no interior do compartimento ( $\text{mg}/\text{h}$ );
- $V$  = volume da zona ( $\text{m}^3$ );
- $\lambda_v$  = taxa de renovação ( $\text{h}^{-1}$ );
- $C_{\text{ext}}$  = Concentração do poluente no exterior ( $\text{mg}/\text{m}^3$ );
- $v_d$  = velocidade de deposição do poluente ( $\text{mg}/\text{h}/\text{m}^2$ );
- $S_{\text{up}}$  = superfície de deposição ( $\text{m}^2$ );
- $Q_{\text{ac}}$  = caudal através do purificador de ar ( $\text{m}^3/\text{h}$ );
- $\varepsilon_{\text{ac}}$  = eficiência do purificador de ar (adimensional).

### 2.3.4 Valores limites de concentrações de poluentes

Em termos globais, podemos dizer que, não existe uma só norma que estabeleça valores referências para todos os poluentes da QAI. O que existe são normas nacionais e internacionais que reflectem os resultados de vários estudos relevantes epidemiológicos, clínicos, e testes toxicológicos, associados a determinados tempos de exposição das pessoas aos poluentes.

A OMS possui directrizes com normas específicas para valores referência e limites de exposição de vários poluentes, direccionadas para diferentes países. No caso da Europa, a primeira edição de um guia da qualidade do ar (*Air Quality Guidelines*) publicado pela OMS foi em 1987, e revisto em 2000, em uma segunda edição para abordar os riscos de saúde relacionados a 37 dos poluentes atmosféricos mais comuns [23]. Desde então, com novos estudos e a aquisição de conhecimentos na área, o guia sofreu outras revisões. No Anexo 1, são apresentados os valores referência de alguns poluentes da QAI, segundo a OMS para a Europa, e outras normas utilizadas no Canadá, Alemanha e Estados Unidos. A concentração indicada é considerada "máxima admissível", e por vezes, associada a um determinado tempo de exposição no ar ambiente interior dos edifícios e ambientes de trabalho industrial. No Anexo 2 são apresentados alguns valores de referência das concentrações de alguns

poluentes de interesse, que causam um determinado efeito na saúde e no ambiente, e que servem de guia para projectos de edifícios, diagnósticos, e projectos de sistemas de ventilação, quando se utiliza o procedimento IAQ (secção 2.3.7) da norma ASHRAE 62-2007.

Em Portugal, as concentrações de algumas substâncias não devem ultrapassar os limites máximos impostos no RSECE (Tabela 2), cuja verificação é obrigatória, no caso de edifícios ou fracções autónomas existentes, na realização de auditorias periódicas [2].

**Tabela 2 - Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios existentes estabelecidas no RSECE.**

Parâmetros	Concentração máxima de referência	RSECE
Partículas suspensas no ar (PM10)	0,15 mg/m <sup>3</sup>	ANEXO VII
Dióxido de carbono	1800 mg/m <sup>3</sup>	
Monóxido de carbono	12,5 mg/m <sup>3</sup>	
Ozono	0,2 mg/m <sup>3</sup>	
Formaldeído	0,1 mg/m <sup>3</sup>	
Compostos orgânicos voláteis totais	0,6 mg/m <sup>3</sup>	Artigo 29º
Fungos e Bactérias	500 UFC */m <sup>3</sup>	
Radão **	400 Bq/m <sup>3</sup>	

\*UFC = Unidades formadoras de colónias

\*\* pesquisa obrigatória apenas em edifícios construídos em zonas graníticas

Conforme mostra a Tabela 2, o valor de 1800 mg/m<sup>3</sup> (1000 ppm) é o limite máximo para a concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente interior conforme o RSECE, e será utilizado como valor limite de referência neste estudo.

### 2.3.5 Melhorar a QAI nos edifícios

A redução dos contaminantes em edifícios e a consequente melhoria da qualidade do ar interior pode ser alcançada através de duas estratégias [13]:

- (a) redução dos contaminantes exteriores que entram em ambientes;
- (b) redução dos contaminantes interiores.

Nos sistemas de ventilação (AVAC), normalmente utiliza-se filtros para a redução dos poluentes exteriores que entram nos edifícios pela injeção de ar atmosféricos e também na recirculação do ar interior. Uma filtragem eficiente executa uma defesa preliminar dos

---

ocupantes do edifício contra determinados poluentes e equipamentos, reduzindo os problemas relacionados com a QAI.

Os contaminantes gerados por fontes interiores podem ser reduzidos através da diminuição de fontes poluidoras. Esta estratégia designada por controlo na fonte (*source control*), diz respeito a utilização de materiais menos poluentes, como sejam, materiais do edifício, materiais do mobiliário, escolhas de equipamentos eléctricos. A escolha de materiais de baixa emissão implica a prévia caracterização da generalidade dos materiais de construção quanto ao seu potencial poluidor [24]. A remoção dos contaminantes na fonte, como por exemplo: os sistemas de exaustão local devem ser utilizados em áreas como cozinhas de forma a remover os contaminantes assim que eles são produzidos.

Outra estratégia de melhoria é a ventilação, principalmente, pelo fornecimento de ar limpo a um espaço, e a extracção de elementos contaminantes. Os sistemas de ventilação eficazes, quando bem dimensionados e operados (com boas condições de higiene e devida manutenção de sistemas de tratamento de ar) são particularmente importantes para reduzir os efeitos negativos dos sistemas de ar condicionado na QAI.

Utilização de plantas no interior. Alguns estudos apontam a vantagem das plantas no ambiente interior dos edifícios, devido a redução da concentração de alguns poluentes. Num edifício de serviços em Nova Delhi foram feitos experimentos e testes com três tipos de plantas no seu interior durante 15 anos. O estudo concluiu que existe uma probabilidade de 42% do aumento em 1% de oxigénio no sangue, se a permanência do indivíduo dentro do edifício for cerca de 10 horas. Foi realizado um outro experimento, onde o edifício foi selado por 6 semanas, e descobriu-se que a qualidade do ar no interior do edifício foi melhor do que no exterior, além da poupança nos custos de energia em mais de 15%, com a diminuição da renovação ar interior [25].

### **2.3.6 Conforto higrotérmico**

O conforto desejado pelo corpo humano depende primariamente de três factores: temperatura, humidade relativa (HR) e movimento do ar. A temperatura é o índice mais importante do conforto. A maioria das pessoas sente-se confortável quando a temperatura situa-se entre 22 e 27 °C [26].

A definição clara de conforto em edifícios não é facilmente alcançável, uma vez que depende de factores subjectivos, obtidos através de sensações humanas que diferem de pessoa para

pessoa. Correntemente considera-se que um indivíduo está colocado em condições de conforto quando não experimenta qualquer desagrado ou irritação de modo a distraí-lo das suas actividades. A condição básica para que tal se verifique é a de que o sistema termorregulador do organismo se encontre em equilíbrio com o ambiente envolvente, obtendo-se então um estado de neutralidade térmica.

### **2.4 Ventilação**

A ventilação é claramente um dos principais meios para assegurar uma qualidade do ar aceitável [13]. São diversas as utilizações dos edifícios e/ou as necessidades dos ocupantes que exigem o conhecimento da ventilação. A renovação do ar – a ventilação e substituição do ar ambiente por ar exterior “novo” ou a recirculação, com uma percentagem de renovação e “limpeza” do ar existente – é um processo de remoção significativa de poluentes, fazendo com que os fumos e gases nocivos ou de cheiro incómodo possam ser rapidamente evacuados, uma vez que os contaminantes estão intimamente ligados aos deslocamentos de ar.

Porém, o paradigma da utilização da ventilação – para garantir uma QAI adequada e minimizar a exposição dos ocupantes a determinados poluentes – surge devido à variedade de fontes e poluentes [27]. Os poluentes de fontes interiores devem ser dispersos pela injeção do ar novo, enquanto os provenientes de fontes exteriores devem ser minimizados através da redução da troca de ar entre o exterior e o interior. Quando os poluentes possuem origem em ambas as fontes, exteriores e interiores (e.g. partículas, óxidos de azoto e monóxido de azoto), a garantia da renovação de ar vai depender da intensidade dos poluentes entre o exterior e o interior.

O próprio sistema de ventilação pode constituir uma fonte de riscos para a saúde, como no caso de crescimento de microrganismos e emissões de COV, causados pela acumulação de partículas nos sistemas de ventilação [17], muito provavelmente pela falta de manutenção e limpeza.

Outra grande importância da ventilação em edifícios é o controlo da humidade e prevenção da condensação no interior, devido aos respectivos problemas já referidos.

#### **2.4.1 Tipos de ventilação**

A ventilação nos edifícios pode ser realizada naturalmente, por meios mecânicos ou por ambos os processos. Nos sistemas de ventilação natural, a renovação do ar ocorre através das

---

aberturas na envolvente, com regulação manual ou auto-controladas, através de mecanismos naturais como o vento e as diferenças de temperatura que causam o movimento do ar. A ventilação natural funciona como uma estratégia de promoção da QAI, baseada na renovação de ar e na diluição da concentração dos poluentes no interior do edifício. Mecanicamente, a renovação do ar é conseguida pela insuflação de ar exterior e extracção do ar interior do espaço, através um sistema de condutas e ventiladores.

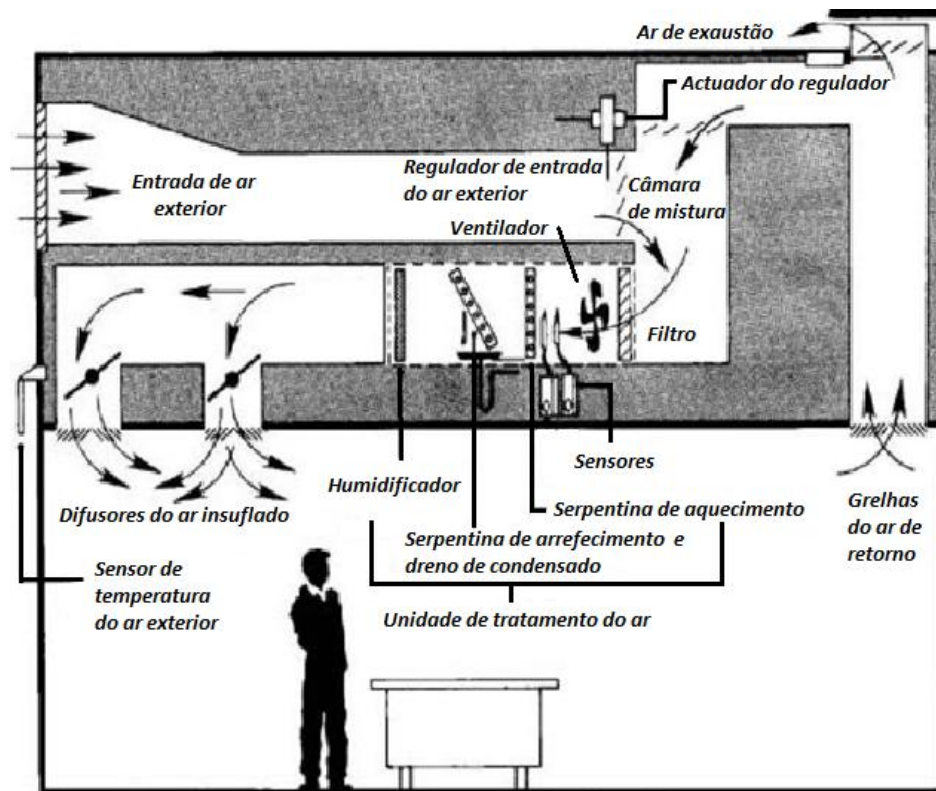
A aplicação de sistemas de ventilação puramente natural pode ser limitada em climas quentes e húmidos, por questões de conforto térmico e da necessidade de confiança. De acordo com o estudo realizado na Universidade de Aveiro (UA), numa campanha experimental com monitorização da QAI em dois espaços ventilados naturalmente do Departamento do Ambiente e Ordenamento, a QAI não foi adequada, sobretudo durante o período de ocupação [28].

No entanto, os sistemas híbridos (ou de modo misto) de ventilação ou estratégias operacionais oferecem a possibilidade de poupar energia num maior número de edifícios e climas, combinando os sistemas de ventilação natural com equipamentos mecânicos [15].

#### **2.4.2 Sistemas AVAC e seus componentes**

Hoje, modernos sistemas de condicionamento de ar podem aquecer, arrefecer, humidificar, desumidificar, limpar e até mesmo desodorizar o ar, ou seja condicionar o ar de acordo com o desejo das pessoas. O objectivo do sistema AVAC é fornecer não só o conforto térmico aos ocupantes de um edifício como também uma boa qualidade do ar interior através de ventilação e filtragem adequadas.

No caso de edifícios com ar condicionado (climatizados mecanicamente), o sistema AVAC pode ser composto por diferentes equipamentos e suas combinações. Ao projectar o sistema, é necessário ter em conta as condições externas e internas do edifício. As condições exteriores (temperatura, humidade relativa, vento, radiação solar, etc.) dependem da zona climática onde o edifício está localizado, e afectam significativamente as cargas térmicas do edifício.



**Figura 5 - Representação dos componentes típicos do sistema AVAC [29].**

Alguns exemplos de processos de condicionamento de ar são: aquecimento e arrefecimento simples, aquecimento com humidificação e arrefecimento com desumidificação.

Para o projecto de edifícios e dimensionamento de sistemas AVAC, os critérios de conforto térmico (temperatura mínima no inverno, temperatura máxima no verão) devem ser utilizados como entrada para os cálculos das cargas de aquecimento e arrefecimento.

A ventilação do sistema é geralmente dimensionada pelo caudal mínimo por pessoa ( $\text{m}^3/\text{h.pessoa}$ ), multiplicado pelo número máximo de pessoas previstas em fase de projecto; pode ser também dimensionado pela área de pavimento, multiplicando-se esta pelo correspondente caudal mínimo por área ( $\text{m}^3/\text{h.área}$ ); prevalecendo o caudal que for maior quando houver ambas as indicações, como no caso do RSECE, ou pode ainda ser obtido pela soma de ambos os caudais, como no caso do procedimento VRP da ASHRAE.

A ventilação é um problema de difícil solução e constitui o maior desafio do projecto de AVAC. Sistemas de ventilação possuem um peso muito significativo no custo da obra, da exploração e manutenção do edifício [30].



---

### 2.4.3 Análise da QAI através do CO<sub>2</sub>

A concentração de CO<sub>2</sub> interior de espaços ocupados é um indicador útil e relevante, sendo directamente indicativo da presença de pessoas, devido ao CO<sub>2</sub> ser produzido pela respiração, sem revelar, muitas vezes, uma relação específica entre o CO<sub>2</sub> e a QAI [31].

A monitorização dos níveis de CO<sub>2</sub> deve ser usada com precaução como indicador da QAI aceitável. A premissa básica é de que se o sistema AVAC não está a remover o CO<sub>2</sub> devido à uma insuficiente taxa de ventilação do ar novo, então os outros poluentes estão provavelmente a acumular na mesma proporção [17]. No entanto, esta premissa pode ser um potencial de erro e má interpretação devido a negligência de poluentes não associados aos ocupantes. O dióxido de carbono em si não é responsável pelas queixas, no entanto, um elevado nível de dióxido de carbono pode indicar que outros contaminantes no edifício também podem estar presentes em níveis elevados e podem ser responsáveis por queixas dos ocupantes [32]. Poderá haver uma maior fonte de contaminação interior, tais como gases que saem de materiais de construção e móveis, mesmo com níveis de concentração de CO<sub>2</sub> baixos, tornando-se este apenas um método indirecto de determinação da ventilação adequada. A comparação de uma concentração elevada (pico de leitura de CO<sub>2</sub>) entre salas e entre zonas com tratamento de ar pode ajudar a identificar e diagnosticar várias deficiências na ventilação [17].

Há uma série de abordagens diferentes em que as concentrações de CO<sub>2</sub> no interior podem ser usadas para avaliar a ventilação do edifício. Estas abordagens incluem a determinação do percentual de entrada de ar exterior numa UTA (unidade de tratamento de ar), a determinação das taxas de renovação do ar de edifícios usando o decaimento do gás traçador e pela análise de equilíbrio [31]. Em algumas circunstâncias, as concentrações de CO<sub>2</sub> interiores podem ser utilizadas para estimar as taxas de ventilação do ar exterior com base na técnica da injeção constante de um gás traçador. A técnica de injeção constante envolve a injeção de um gás traçador em uma monozona, a uma taxa constante e conhecida. Essa técnica é por vezes referida como análise de equilíbrio quando o CO<sub>2</sub> gerado pelos ocupantes é usado como o gás traçador [33].

Considerando ainda uma monozona (Capítulo 2.2.3), substituindo-se o termo  $G$  da Equação (1) pela fonte emissora de CO<sub>2</sub>, pode-se escrever para efeito de simplificação, a seguinte equação diferencial (Equação (2)), onde são desprezados os termos de deposição, absorção e filtragem de poluentes:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{S}{V} + \lambda_v C_e - \lambda_v C_i(t) \quad (\text{ppm}) \quad (2)$$

onde:

$C_i$  = concentração de CO<sub>2</sub> interior no instante t (ppm);

$C_e$  = concentração de CO<sub>2</sub> exterior no instante t (ppm);

$S$  = produção de CO<sub>2</sub> no instante t (m<sup>3</sup>/s).

A  $C_e$  diz respeito ao CO<sub>2</sub> presente na composição do ar atmosférico, por ser este um componente natural do ar. A quantidade de CO<sub>2</sub> em uma amostra de ar é normalmente expressa em partes por milhão (ppm), e varia tipicamente entre 300 a 500 ppm no ar exterior [17].

Se a monozona em questão possuir ventilação mecânica e uma boa mistura do ar, e sendo a taxa de renovação  $\lambda_v$ , o caudal volúmico de ar novo a dividir pelo volume do espaço (secção 2.3.5), a equação do balanço de massa da concentração de CO<sub>2</sub> será:

$$V \frac{dC_i}{dt}(t) = S + QC_e - QC_i(t) \quad (\text{ppm}) \quad (3)$$

onde:

$Q$  = caudal de ar novo (m<sup>3</sup>/s).

No interior de edifícios, a sua gama de concentração pode variar entre 500 e 5000 ppm. Altas concentrações de CO<sub>2</sub> no ar podem ser indicadores da combustão (motores veiculares, fogões de cozinha, esquentadores, lareiras, aquecedores, etc.) e de outras fontes contaminantes, como fumo de tabaco, etc.

O CO<sub>2</sub> pode tornar-se perigoso não como um agente tóxico, mas como um asfixiante secundário. Quando as concentrações excederem 35000 ppm, os receptores centrais da respiração são accionados e causam a sensação de falta de ar. Em concentrações progressivamente maiores, disfunção do sistema nervoso central começa devido ao deslocamento simples de oxigénio [15].

#### **2.4.4 Produção de CO<sub>2</sub> pelas pessoas**

A produção de CO<sub>2</sub> pelas pessoas depende de uma série de variáveis, como a actividade física, do tamanho e altura do corpo, etc. Na respiração humana o consumo volumétrico de O<sub>2</sub> é maior que o volume de CO<sub>2</sub> emitido. O rácio da taxa volumétrica entre o oxigénio (O<sub>2</sub>) consumido e o CO<sub>2</sub> produzido (RQ) depende da dieta, do nível de actividade física, e das

condições físicas da pessoa. Para um adulto de tamanho médio com actividade sedentária ou leve, e com dieta normal balanceada em carboidratos, proteínas e gorduras,  $RQ = 0,83$  [31] [16].

A produção de  $CO_2$  por pessoa é dada por [15]:

$$S_p = V_{O_2} RQ \quad (\text{l/s.pessoa}) \quad (4)$$

onde:

$V_{O_2}$  = consumo de oxigénio (l/s.pessoa).

O oxigénio consumido por uma pessoa é dado pela seguinte equação [15]:

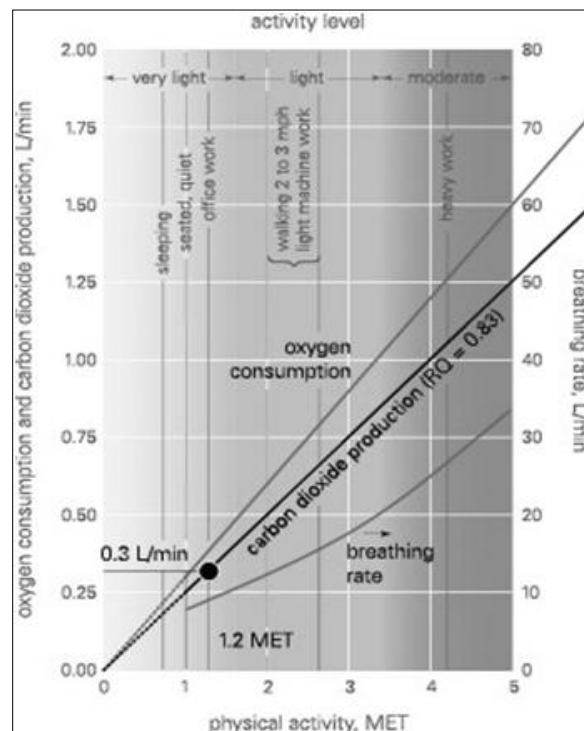
$$V_{O_2} = \frac{0,00276 A_{Du} M}{(0,23 RQ + 0,77)} \quad (\text{l/s.pessoa}) \quad (5)$$

onde:

$A_{Du}$  = Área de superfície do corpo (área de DuBois) ( $m^2$ );

$M$  = taxa metabólica (met).

Uma pessoa emite aproximadamente 0,31 l/min (0,0052 l/s) de  $CO_2$ , considerando uma actividade metabólica de 1,2 met,  $RQ = 0,83$  e  $A_{Du} = 1,8 m^2$  (correspondente a um adulto de tamanho médio). O Figura 2 mostra a produção de  $CO_2$  conforme o nível de actividade física, numa relação linear, para um valor de  $RQ$  conhecido.



**Figura 6 - Consumo de  $O_2$  e produção de  $CO_2$  em função da actividade física [16]**

### 2.4.5 Taxa de renovação de ar por hora

A taxa nominal de ar trocado ou renovado refere-se ao caudal de ar novo introduzido num edifício ou zona, a dividir pelo volume do espaço em estudo. Usualmente a unidade da taxa de ar renovado é  $\text{h}^{-1}$ , o que faz com que essa taxa seja chamada de renovação de ar por hora (rph).

$$\lambda_v = \frac{Q}{V} \quad (\text{h}^{-1}) \quad (6)$$

onde:

- $\lambda_v$  = taxa nominal de troca de ar ( $\text{h}^{-1}$ );
- $Q$  = caudal de ar de renovação ( $\text{m}^3/\text{h}$ );
- $V$  = volume ( $\text{m}^3$ ).

O caudal de ar exterior pode incluir a ventilação mecânica e/ou a resultante das infiltrações. A taxa nominal de troca de ar não descreve a recirculação ou distribuição do ar para cada espaço dentro do edifício ou zona. Para um determinado espaço ou zona com recirculação de ar, uma avaliação mais precisa deve ser feita através do desempenho do difusor de ar e da mistura do ar no espaço.

A taxa de ventilação é uma das considerações gerais no planeamento de um sistema de climatização, tendo um enorme impacto no consumo de energia do sistema. Uma taxa de ventilação mais alta do que a requerida, não só exige ventiladores sobredimensionados, como também aumenta as cargas do sistema, devido ao ar exterior introduzido num edifício constituir uma grande parte da carga total do espaço condicionado (aquecimento, arrefecimento, humedificação e carga de desumidificação). Esse é o principal motivo da limitação mínima para as taxas de renovação de ar em edifícios, actualmente exigida pelas normas. A troca ou renovação de ar representa tipicamente 20 a 50 % da carga térmica de um edifício [15].

A taxa de ventilação mínima do ar externo de 8 l/s é necessária para satisfazer as percepções de odor de 80 % ou mais dos visitantes. Com essa taxa de renovação, a concentração de  $\text{CO}_2$  no interior mantém-se em 0,07 % (700 ppm) da concentração exterior (300 ppm), assumindo uma taxa de produção típica de  $\text{CO}_2$  por ocupante [16].

O valor absoluto de 1000 ppm (1800  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) – especificado na ASHRAE Standard 62, edição de 1989 [34] – foi muitas vezes interpretado como o limite máximo de concentração de  $\text{CO}_2$

---

para a qualidade do ar interior aceitável. No entanto, este valor foi baseado numa taxa de ventilação específica de 26 m<sup>3</sup>/pessoa, num nível de actividade de 1.2 met, e numa concentração de CO<sub>2</sub> do ar exterior de 300 ppm, fazendo com que a diferença de concentração de CO<sub>2</sub> entre o interior e o exterior fosse de 700 ppm, pelo critério de conforto (nível aceitável de bioefluentes humanos).

#### **2.4.6 Exigências RSECE**

Um dos objectivos do RSECE é de impor regras de eficiência aos sistemas de climatização que permitam melhorar o seu desempenho energético efectivo e garantir os meios para a manutenção de uma boa QAI, quer a nível de projecto, quer a nível da sua instalação, quer durante o seu funcionamento, através de uma manutenção adequada [2].

Os requisitos e limitações para a garantia da QAI impostos pelo RSECE, para além das concentrações máximas de referência de poluentes (Capítulo 2.2.4), os quais envolvem parâmetros químicos e biológicos, devem ser verificados também os parâmetros físicos que estão directamente ligados ao conforto.

Parâmetros físicos recomendados e obrigatórios [2] [9]:

- A temperatura de referência do ar é de 25 °C no Verão e de 20 °C no Inverno;
- A referência para a humidade relativa na estação de arrefecimento é de 50 %;
- A Velocidade do ar deve ser inferior a 0,2 m/s (verificação obrigatória no caso de novos sistemas AVAC a instalar em edifícios novos ou existentes);
- Os caudais mínimos de ar novo são definidos de acordo com o tipo de actividade do edifício, estipulado no RSECE, conforme mostra a Tabela 3. A verificação dos caudais é obrigatória no caso de novos edifícios.

Tabela 3 - Caudais mínimos de ar novo estabelecidos no RSECE.

Tipo de actividade		Caudais mínimos de ar novo	
		m <sup>3</sup> /h.ocupante	m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup>
Residencial	Sala de estar e quartos	30	-
	Salas de espera	30	-
Comercial	Lojas de comércio	-	5
	Áreas de armazenamento	-	5
	Vestiários	-	10
	Supermercados	30	5
	Sala de refeições	35	-
Serviços de refeições	Cafetarias	35	35
	Bares, salas de cocktail	35	35
	Sala de preparação de refeições	30	-
	Quartos/suites	30	-
Empreendimentos turísticos	Corredores/átrios	-	5
	Corredores/átrios	-	5
Entretenimento	Auditório	30	-
	Zona do palco, estúdios	30	-
	Café/foyer	35	35
	Piscinas	-	10
	<b>Ginásio</b>	<b>35</b>	-
	<b>Gabinetes</b>	<b>35</b>	<b>5</b>
Serviços	Salas de conferência	35	20
	Salas de assembleia	30	20
	Salas de desenho	30	-
	Consultórios médicos	35	-
	Salas de recepção	30	15
	Salas de computador	30	-
	Elevadores	-	15
	Salas de aula	30	-
Escolas	Laboratórios	35	-
	Auditórios	30	-
	Bibliotecas	30	-
	Bares	35	-
	Quartos	40	-
Hospitais	Áreas de recuperação	30	-
	Áreas de terapia	30	-

Outras verificações de conformidade regulamentar deverão ser executadas, as quais estão relacionadas com as condições de higiene e de manutenção dos espaços e dos sistemas de AVAC, como plano de manutenção, etc. [35].

Os caudais de ar novo de renovação referidos na Tabela 3 referem-se a valores efectivamente introduzidos nos espaços ocupados, devendo o dimensionamento dos sistemas ter em conta a eficácia da ventilação, a qual é a razão entre o caudal de ar novo que é insuflado num dado

---

espaço e o caudal de ar novo que chega efectivamente à zona ocupada desse espaço, definida como o volume correspondente à área útil até um pé-direito útil de 2 m [2].

É importante salientar, que o RSECE não especifica quando o sistema de ventilação deve funcionar. Outra particularidade da legislação, por “incoerências” ou “forma de aplicação” da mesma, é a ausência da obrigatoriedade do cálculo da componente de ventilação natural em função do clima temperado de Portugal, tendo como consequências [36]:

- excessos de soluções e componentes mecânicos vs. eficiência energética
- utilização de soluções ambientalmente e energeticamente menos eficazes

#### **2.4.7 Exigências ASHRAE**

A norma ASHRAE Standard 62, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, teve a sua primeira edição em 1973. Desde então houve muitas alterações, embora o objectivo permanecesse em especificar as taxas de ventilação mínimas e outras medidas destinadas a proporcionar qualidade do ar interior que fosse aceitável para os ocupantes humanos e que minimizasse os efeitos adversos para a sua saúde, para diferentes tipos de edifícios e espaços. Esta norma destina-se a aplicação da regulamentação em edifícios novos, e nas remodelações de edifícios existentes que estão enquadradas no corpo da norma. A norma também pode ser utilizada como guia na orientação da melhoria da qualidade do ar interior dos edifícios existentes [16].

Na sua primeira edição, a norma adoptou uma abordagem prescritiva para a ventilação, especificando as taxas mínimas e os caudais de ar exterior recomendados para a obtenção de uma QAI aceitável para uma variedade de espaços interiores. Na sua edição de 1981, a norma reduziu as taxas mínimas de ar exterior e introduziu uma abordagem alternativa baseada no desempenho (*Indoor Air Quality Procedure* – IAQ). Este procedimento permite o cálculo da quantidade de ar exterior necessário para manter os níveis de contaminantes do ar interior abaixo dos limites recomendados. Ainda hoje, na última edição (62.1-2010), a norma mantém os dois procedimentos, o IAQ e o *Ventilation Rate Procedure* (VRP) [37].

A norma especifica requisitos para os sistemas mecânicos de ar condicionado com capacidade de desumidificação, os quais devem ser projectados para que a humidade relativa do espaço ocupado seja limitada a 65 % ou menos, quando o sistema é analisado através do ar exterior e as cargas interiores, e houver necessidade de desumidificação.

#### 2.4.7.1 Ventilation Rate Procedure

O procedimento normativo, prescritivo, VRP, segundo a edição de 2007 da norma ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2007 – *Ventilation for acceptable Indoor Air Quality*, possui requerimentos quanto ao caudal de ar mínimo exterior insuflado, o qual é especificado por pessoa ou por unidade de área de pavimento, e que varia com o tipo de uso do edifício ou espaço.

O caudal de ar novo para a zona de respiração (*Breathing Zone Outdoor Airflow*) segue o procedimento de acordo com as Equações (7) e (8), considerando um espaço monozona, ou se o ar fornecido para a zona for 100 % de ar novo.

$$Q_{bz} = Q_p N_{m\acute{a}x} + Q_{\acute{a}rea} A \quad (l/s) \quad (7)$$

onde:

$Q_{bz}$  = caudal de ar novo requerido na zona de respiração (l/s);

$Q_p$  = caudal de ar novo requerido por pessoa (l/s.pessoa);

$N_{m\acute{a}x}$  = população máxima da zona (pessoas);

$Q_{\acute{a}rea}$  = caudal de ar novo requerido por área (l/s.m<sup>2</sup>);

$A$  = área útil (m<sup>2</sup>).

O Anexo 3 apresenta os valores de referência para  $Q_p$  e  $Q_{\acute{a}rea}$  da respectiva norma.

O caudal de ar novo requerido na zona de respiração ( $Q_{bz}$ ) deve ser corrigido pela eficácia da distribuição do ar na zona, a qual depende da configuração do sistema de distribuição na zona:

$$Q = \frac{Q_{bz}}{Ef} \quad (l/s) \quad (8)$$

onde:

$Q$  = caudal de ar novo (m<sup>3</sup>/s);

$Ef$  = eficácia da distribuição de ar .

O valor de  $Ef$  é tabelado pela norma (Anexo 4).

Para além dos requerimentos dos caudais mínimos de renovação do ar, que deve ser mantidos durante qualquer condição de carga e em todo o período de ocupação do espaço, existem outros: a verificação da qualidade do ar exterior e o seu tratamento caso não atenda aos padrões de qualidade do ar ambiente definidos pela EPA (*Environment Protection Agency* - US), a localização das entradas de ar exterior no edifício, entre outras.



---

O VRP em questão exige que o projectista determine o caudal de ar exterior mínimo de projecto na zona de respiração, com base tanto no pico de ocupação da zona (taxa de ar novo por pessoa), como no tamanho da zona (taxa de ar novo por unidade de área). Porém, a norma permite o ajuste do projecto de acordo com a sua secção *Dynamic Reset*, normalmente indicado para zonas com altas densidades ocupacionais, as quais muitas vezes operam abaixo do pico populacional previsto. Assim, o caudal de ar novo da zona, necessário durante a operação, pode ser reajustado dinamicamente, usando as equações (7) e (8), com a ocupação real em vez da ocupação máxima ou de pico. Exemplos desses sistemas são os chamados sistemas de ventilação controlados pela demanda.

#### **2.4.7.2 Ventilação controlada pela demanda**

Nos Sistemas de ventilação controlados pela demanda (*Demand Controlled Ventilation – DCV*) a taxa de ventilação é controlada pela qualidade do ar, humidade, ocupação ou algum outro indicador para a necessária ventilação [38].

O controlo da ventilação pela demanda de ar novo oferece a possibilidade de um projecto de ventilação mais eficiente energeticamente, quando comparado com outro projecto com taxas de ventilação constantes baseadas na ocupação máxima. O DCV é uma estratégia de controlo que responde à demanda real para ventilação, regulando a taxa de ar novo que entra no edifício pelo sistema de climatização. Existem várias maneiras de avaliar a demanda de ventilação [39]:

- por sensores de ocupação, que detectam a presença ou o número de pessoas em cada espaço monitorizado;
- por horários de ocupação, o que permite um sistema de automação predial para prever a população actual com base no tempo do dia;
- por sensores que monitorizam a concentração de CO<sub>2</sub> que os ocupantes produzem continuamente.

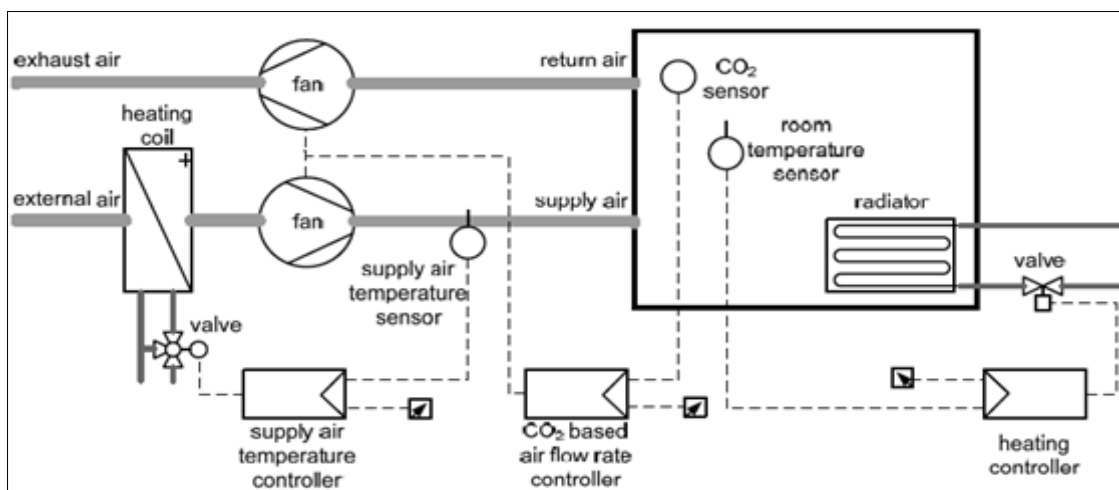


Figura 7 - Exemplo de uma estratégia de ventilação DCV [39].

Uma série de questões relacionadas com DCV existem, como por exemplo; os benefícios no consumo de energia com as estratégias de controlo óptimo e os impactos da qualidade do ar interior para os contaminantes cujas origens são independentes do número de ocupantes.

## 2.5 Classificação de ambientes interiores

A norma EN 15251, uma das normas de suporte à EPBD, pertence a uma série de normas que têm como objectivo a uniformização europeia das metodologias para o cálculo do desempenho energético dos edifícios. A norma especifica os parâmetros ambientais interiores que têm impacto no desempenho energético dos edifícios; define a forma de estabelecer parâmetros ambientais interiores que devem ser considerados no projecto dos sistemas para o edifício e os cálculos do desempenho energético. Os ambientes estão divididos em quatro categorias (I, II, III e IV), descritas na Tabela 4 [13].

Tabela 4 - Descrição da aplicabilidade das categorias

Categoria	Explicação
I	Alto nível de expectativa e é recomendado para espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e frágeis com requisitos especiais como pessoas com deficiências, doentes, crianças muito novas ou pessoas idosas.
II	Nível normal de expectativa e deve ser usado para edifícios novos e reabilitações.
III	Um nível aceitável, moderado de expectativa e pode ser utilizado para edifícios existentes.
IV	Valores fora dos critérios das categorias mencionadas. Esta categoria só deve ser aceite para um período limitado do ano.

Segundo a norma EN 15251:2007, os ambientes são classificados em função das concentrações de pico recomendadas de CO<sub>2</sub> interior, definidas em quatro categorias (I, II, III e IV), apresentadas na Tabela 5 [13].

**Tabela 5 - Exemplos das concentrações de CO<sub>2</sub> recomendadas acima das concentrações exteriores para o cálculo de energético e controlo da procura.**

<b>Categoria</b>	<b>CO<sub>2</sub> correspondente acima do exterior em ppm para cálculos energéticos</b>
I	350
II	500
III	800
IV	> 800

A Norma sugere os valores para o cálculo da taxa de ventilação que se aplica a dissipação da poluição por parte de pessoas ( $Q_p$ ) e a partir de fontes do edifício ( $Q_{area}$ ).

**Tabela 6 - Taxas de ventilação recomendadas para a diluição dos bioefluentes emitidos pelas pessoas para diferentes categorias [13].**

<b>Categoria</b>	<b>Taxa de renovação por pessoa (<math>Q_p</math>)(l/s.pessoas)</b>	<b>Taxa de renovação por emissão poluente do edifício (<math>Q_{area}</math>) (l/s.m<sup>2</sup>)</b>		
		Edifício com nível muito baixo de poluição	Edifício com nível baixo de poluição	Edifício com nível não baixo de poluição
I	10	0,5	1	2
II	7	0,35	0,7	1,4
III	4	0,2	0,4	0,8
IV	<4	<0,2	<0,4	<0,8

As taxas de ventilação também são definidas de acordo com a utilização do edifício, em diferentes categorias com recomendações das taxas mínimas de ar novo, tanto pela ocupação como pela área do edifício, que são então somadas para obter a taxa de ventilação total. A Tabela 7 apresenta as taxas de ventilação recomendadas pela EN 15251 para um escritório.

Tabela 7 - Taxas de ventilação recomendadas para escritórios *landscaped* com uma densidade de ocupação por defeito para três categorias de poluição provenientes do próprio edifício [40].

Tipo de edifício ou espaço	Categoria	Densidade ocupacional (m <sup>2</sup> /pessoa)	$Q_p$ (l/s.m <sup>2</sup> )	Edifício com nível muito baixo de poluição (l/s.m <sup>2</sup> )		Edifício com nível baixo de poluição (l/s.m <sup>2</sup> )		Edifício com nível não baixo de poluição (l/s.m <sup>2</sup> )	
				$Q_{area}$	$Q_{tot}$	$Q_{area}$	$Q_{tot}$	$Q_{area}$	$Q_{tot}$
Escritório <i>landscaped</i>	I	15	0,7	0,5	1,2	1,0	1,7	2,0	2,7
	II	15	0,5	0,3	0,8	0,7	1,2	1,4	1,9
	III	15	0,3	0,2	0,5	0,4	0,7	0,8	1,1

## 2.6 Consumo energético resultante da renovação do ar

A renovação do ar resulta num consumo energético devido ao aumento da carga térmica total do edifício, cuja alteração requer energia, normalmente fornecida pelos equipamentos do sistema AVAC, para que se mantenham as condições interiores desejadas. O ar exterior introduzido num edifício constitui uma grande parte da carga total do espaço condicionado (aquecimento, arrefecimento, humedificação e desumidificação). Esse é o principal motivo da limitação mínima das taxas de renovação de ar em edifícios, actualmente exigida pelas normas. Segundo a ASHRAE a renovação de ar pode representar entre 20 a 50 % da carga térmica total de um edifício [41].

A troca de ar influencia a carga térmica de um edifício de três maneiras: pelo calor sensível, pelo calor latente e pelo desempenho do sistema de isolamento térmico.

### 2.6.1 Calor sensível

O calor sensível está associado ao consumo de energia para o aquecimento ou arrefecimento, devido as diferenças de temperatura do ar entre o exterior e o interior quando o ar novo é injectado no ambiente interno. A energia requerida para manter a temperatura interior dentro da faixa de temperatura de conforto desejada é dada pela equação (9), também conhecida como a equação do calor sensível [15]:

$$q_s = Q\rho c_p \Delta T \quad (\text{kW}) \quad (9)$$

onde:

- 
- $Q =$  caudal de ar novo ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $\rho =$  densidade do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $c_p =$  calor específico do ar ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ );
- $\Delta T =$  diferença entre a temperatura interior ( $T_{\text{int}}$ ) e exterior ( $T_{\text{ext}}$ ) ( $^\circ\text{C}$ )

### 2.6.2 Calor latente

A troca de ar também modifica o teor de humidade do ar interno num edifício. Tal como ocorre com a temperatura, a diferença na humidade também deve ser ajustada pelo sistema AVAC. Os processos de tratamento do ar são a humidificação e a desumidificação, conforme a diferença encontrada entre a humidade exterior e a condição de humidade interior desejada.

Para efeitos de estudos higrométricos, a psicrometria aproxima o ar atmosférico a mistura de dois únicos componentes, o ar seco e o vapor de água, também designado como ar húmido. O consumo de energia relativo as cargas latentes (negligenciando a energia associada com qualquer condensado), ou seja para humidificar ou desumidificar o ar, é dado pela seguinte equação [15]:

$$q_l = 3,01 \times 10^3 Q \Delta W \quad (\text{kW}) \quad (10)$$

onde:

$\Delta W =$  Diferença entre o teor de humidade do ar interior e exterior (kg de vapor de água / kg ar seco).

O teor de humidade do ar húmido ou humidade específica do ar é definido como a massa de vapor de água existente na mistura por unidade de ar seco [26]:

$$W = \frac{M_w}{M_a} \quad (\text{kg de vapor de água / kg de ar seco}) \quad (11)$$

onde:

$W =$  teor de humidade do ar húmido (kg de vapor de água / kg de ar seco);

$M_w =$  massa de vapor de água (kg de  $\text{H}_2\text{O}$ );

$M_a =$  massa de ar seco da mistura (kg de ar seco).

Enquanto a mistura ar seco e vapor de água não se tornar saturada, pode admitir-se que esta se comporta como uma mistura gasosa obedecendo à lei dos gases perfeitos e à lei de Dalton (lei das pressões parciais), e portanto o teor de humidade também poderá ser escrito em função das pressões parciais do vapor de água e de ar seco:

$$W = \frac{R_a}{R_w} \frac{P_w}{P_a} = \frac{287}{461} \frac{P_w}{P_a} = 0.622 \frac{P_w}{P_a} \quad (\text{kg de vapor de água / kg de ar seco}) \quad (12)$$

ou

$$W = 0.622 \frac{P_w}{P_{\text{atm}} - P_w} \quad (\text{kg de vapor de água / kg de ar seco}) \quad (13)$$

onde:

$R_a$  = constante própria do gás ar (J/kg.K);

$R_w$  = constante própria do gás vapor de água (J/kg.K);

$P_w$  = pressão parcial do vapor de água (Pa);

$P_a$  = pressão parcial do ar seco (Pa);

$P_{\text{atm}}$  = pressão atmosférica (Pa).

A humidade relativa (HR) é calculada pelo rácio entre a pressão parcial do vapor saturado e a pressão de saturação, segundo a temperatura e pressão, portanto, obtêm-se  $P_w$  com a seguinte expressão:

$$P_w = \text{HR } P_s \quad (\text{Pa}) \quad (14)$$

A pressão de saturação  $P_s$  pode ser calculada analiticamente, pois é função somente da temperatura, de acordo com a seguinte relação dada pela norma EN ISO 13788 [29] :

$$P_s = 610,5 e^{\left(\frac{17,269T}{237,3+T}\right)} \quad \text{para } T \geq 0^\circ\text{C} \quad (\text{Pa}) \quad (15)$$

$$P_s = 610,5 e^{\left(\frac{21,875T}{265,5+T}\right)} \quad \text{para } T < 0^\circ\text{C} \quad (\text{Pa}) \quad (16)$$

ou também pela correlação quadrática [29]:

$$P_s = 2,4615 T^2 + 37,1182 T + 610,5 \quad (\text{Pa}) \quad (17)$$

---

onde

$T =$  temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

## 2.7 Conforto ambiental vs. poupança energética

O consumo de energia dos edifícios depende significativamente dos critérios usados para o ambiente interior (temperatura, ventilação e iluminação) e do projecto e operação do edifício, os quais também afectam a saúde, a produtividade e o conforto dos ocupantes. Relatar o consumo energético não faz sentido sem relacionar o ambiente interior do edifício. Entretanto as medidas de poupança energética não devem sacrificar o conforto e a saúde dos ocupantes [42].

Num estudo com modelos teóricos investigou-se o impacto de várias estratégias de ventilação no comportamento da concentração de contaminantes ( $\text{CO}_2$  e formaldeído) e as correspondentes necessidades energéticas de um caso monozona. Os resultados deste estudo mostraram que as concentrações de contaminantes aceitáveis podem ser alcançadas por diferentes estratégias de ventilação durante os períodos de ocupação, mas com uma demanda de energia substancialmente diferentes entre elas. Mais de 50 % de redução nas necessidades energéticas pode ser obtida mantendo a QAI aceitável se a estratégia de ventilação adequada for empregada [43].

Outro estudo analisou o custo benefício de medidas de aumento da qualidade do ar em edifícios existentes (escritórios) com ar-condicionado. Os resultados apresentados fornecem estimativas aproximadas da provável melhoria da qualidade do ar em escritórios situados em regiões desenvolvidas do mundo, e constituem um poderoso argumento para o fornecimento de uma melhor QAI com taxas maiores do que os níveis mínimos exigidos pelas normas. Benefícios adicionais no aumento da produtividade com o aumento da QAI podem ser esperados se os custos com a saúde e as abstinências por doenças forem levados em conta. Também foi pressuposto, que o benefício anual devido à melhor qualidade do ar foi sempre pelo menos 10 vezes maior do que o aumento anual de energia e custos de manutenção [44].

## 2.8 Considerações finais

A revisão bibliográfica relacionada ao tema foi abordada de forma que compreendesse os aspectos que serviram de base para esse presente trabalho, tratando de conceitos e do

enquadramento da temática da qualidade do ambiente interior de edifícios e a relação com a ventilação.

Realizou-se um levantamento da normalização internacional (ASHRAE) e regulamentação nacional vigente (RSECE) aplicáveis a QAI e aos sistemas de ventilação, especialmente os caudais mínimos recomendados para os edifícios de serviços, exigências a níveis de poluentes e a classificação de ambientes interiores quanto a QAI. Também fez-se referência a produção e evolução temporal da concentração do CO<sub>2</sub> metabólico no interior, assim como, a influência da troca do ar interior pelo ar exterior na carga térmica dos edifícios.



---

### 3 Metodologia

Este capítulo apresenta a ferramenta utilizada para o desenvolvimento da pesquisa, bem como, a escolha dos parâmetros e estratégias de cálculo adoptados nas simulações das necessidades energéticas e do nível de concentração de CO<sub>2</sub>.

#### 3.1 Ferramenta de simulação

Para a análise da influência da ventilação na concentração de CO<sub>2</sub> e na carga térmica do edifício, foi construído um programa, usando o *software* MATLAB. Com a finalidade de facilitar a sua utilização, foi desenvolvida uma interface gráfica, usando o componente GUIDE do *software* MATLAB [45].

A Figura 8 mostra a interface gráfica, com a indicação de todos os componentes do programa, os gráficos, os campos de introdução numérica, os campos e quadros de escolha múltipla, e também as barras de introdução.

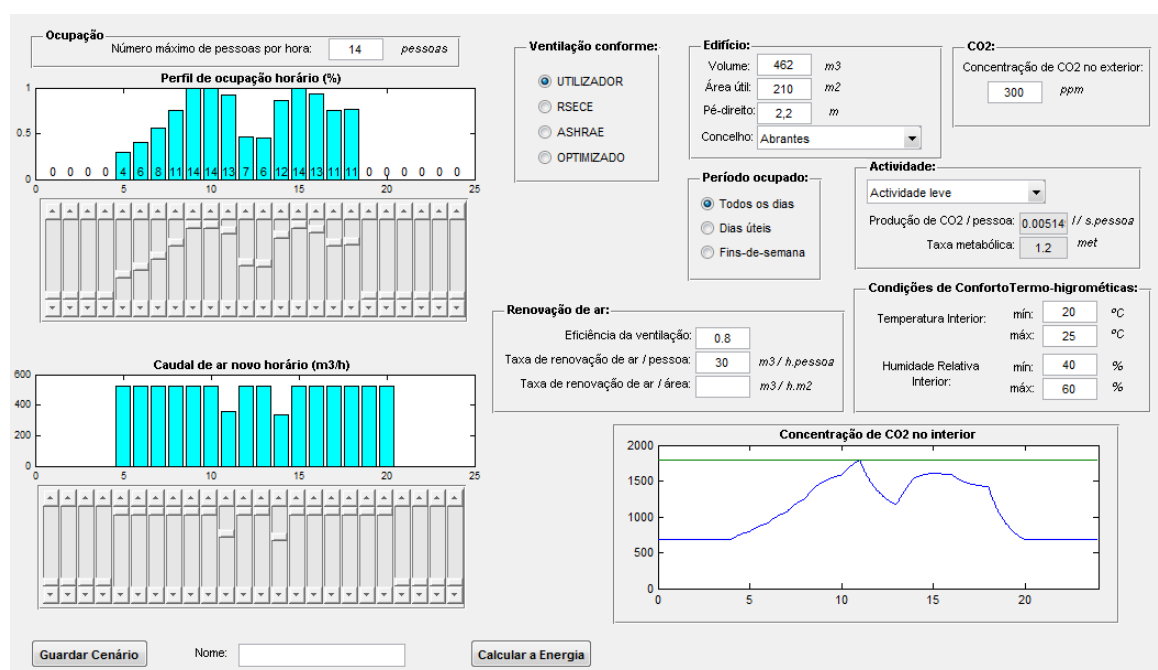


Figura 8- Janela inicial do programa de simulação

Foi também utilizada uma base de dados climáticos com valores hora a hora para um ano inteiro (365 dias) de 290 concelhos portugueses, incluindo o Continente e as ilhas dos Açores

e da Madeira, elaborada pelo Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) em 2006 [46]. Desta base de dados foram utilizados os valores de temperatura e humidade relativa do ar exterior.

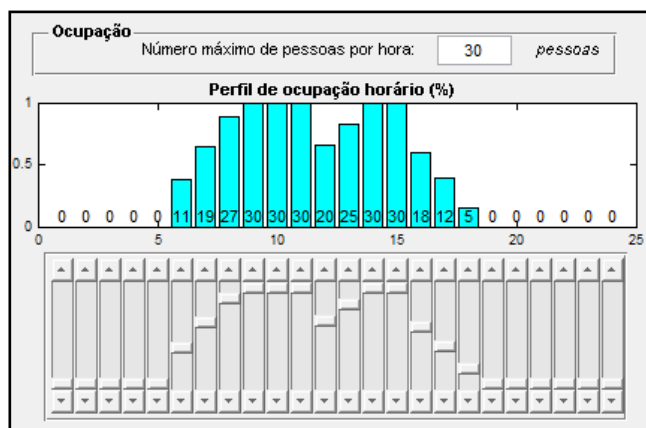
Na janela inicial, são introduzidos os parâmetros, como as características geométricas, as informações relacionadas com a ocupação, as condições desejadas de temperatura e humidade relativa interior, as taxas de renovação de ar por pessoa e pela área, e demais *inputs* para a realização das simulações. Uma descrição detalhada de todas as variáveis de entrada, necessárias para a realização das simulações, é apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8 - Campos de introdução numérica de dados da ferramenta de simulação.**

<b>Campo</b>	<b>Variável</b>	<b>Unidade</b>
volume	$V$	m <sup>3</sup>
pé-direito médio	$P_d$	m
área útil	$A$	m <sup>2</sup>
produção de CO <sub>2</sub> por pessoa	$S_p$	l/s.pessoa
taxa metabólica	$M$	met
concentração de CO <sub>2</sub> exterior	$C_e$	ppm
número máximo de pessoas	$N_{\text{máx}}$	pessoas
caudal mínimo horário por pessoa	$Q_p$	m <sup>3</sup> /h.pessoa
caudal mínimo horário por área	$Q_{\text{área}}$	m <sup>3</sup> /h.área
eficácia da ventilação	$E_f$	adimensional
temperatura interior mínima desejada	$T_{\text{mín}}$	°C
temperatura interior máxima desejada	$T_{\text{máx}}$	°C
humidade relativa mínima desejada	$HR_{\text{mín}}$	%
humidade relativa máxima desejada	$HR_{\text{máx}}$	%

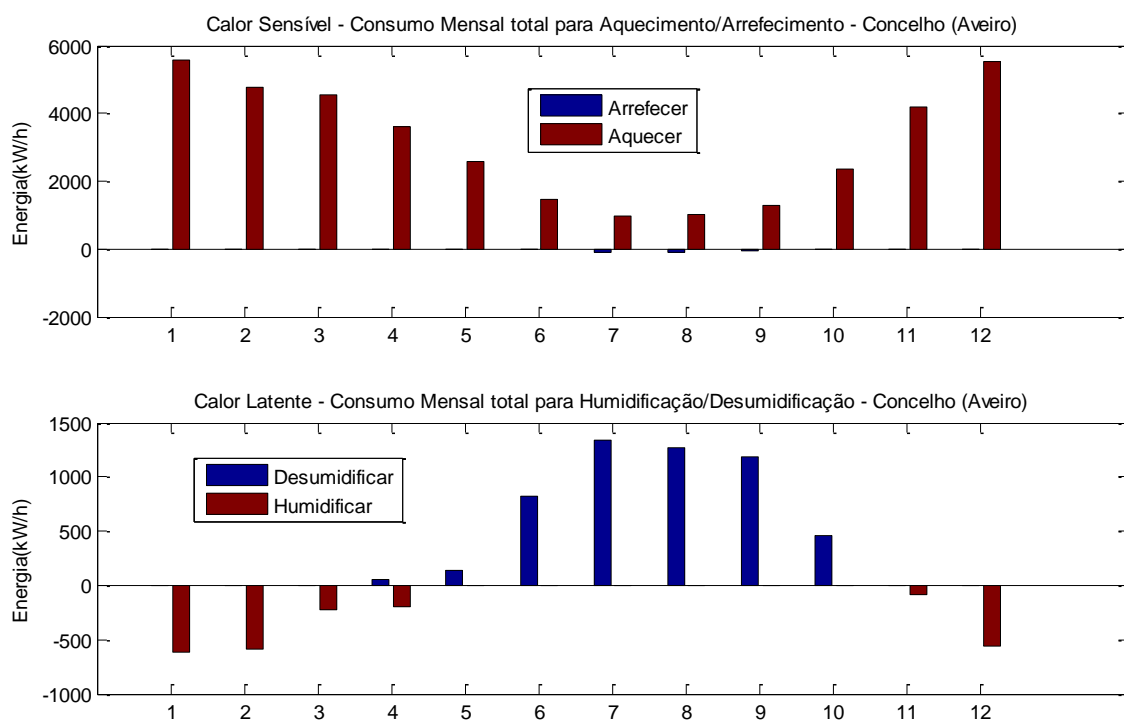
Após a introdução dos parâmetros, a concentração de CO<sub>2</sub> no interior é calculada e apresentada graficamente (canto inferior esquerdo, Figura 8).

O perfil de ocupação diário é introduzido pelas barras de introdução, e o gráfico com a indicação do número de pessoas, e da percentagem de ocupantes em relação ao número máximo, hora a hora, é apresentado acima das barras (Figura 9).



**Figura 9 - Exemplo do perfil de ocupação.**

O botão “Calcular a Energia” (no centro inferior – Figura 8), ao ser accionado, executa o cálculo da energia mensal, para todos os meses do ano. O resultado é apresentado numa nova janela com os gráficos referentes à energia de aquecimento vs. arrefecimento, e humedificação vs. Desumidificação (Figura 10). O cálculo da energia poderá ser efectuado para os 290 concelhos inseridos na base de dados do programa.



**Figura 10 - Exemplo de um gráfico das necessidades energéticas mensais num ano.**

Os valores positivos do gráfico do calor sensível referem-se à energia de aquecimento necessária, e os valores negativos, às necessidades de arrefecimento. No segundo gráfico, os valores negativos correspondem às necessidades mensais de humificação e os positivos são relativos à desumificação.

A ferramenta permite ainda a diferenciação entre dias úteis e fins-de-semana. A utilização desse critério poderá influenciar as necessidades energéticas mensais e anuais, caso os valores dos respectivos caudais sejam distintos.

### 3.1.1 Cálculo da concentração de CO<sub>2</sub> no interior

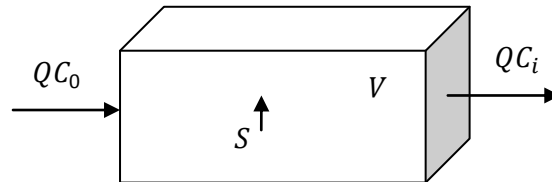
O cálculo da concentração de CO<sub>2</sub> interior baseou-se na resolução analítica da equação diferencial do balanço de massa de CO<sub>2</sub> (Equação (3)), considerando que no instante  $t = 0$ ,  $C_i = C_0$ , e que  $Q$  e  $S$  são constantes num período entre 0 e  $t$ , resultando na seguinte relação:

$$C_i(t) = C_e + \frac{S}{Q} + \left( C_0 - C_e - \frac{S}{Q} \right) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (\text{ppm}) \quad (18)$$

onde:

- $C_i$  = concentração interior de CO<sub>2</sub> (ppm);
- $C_e$  = concentração de CO<sub>2</sub> no exterior (ppm);
- $S$  = caudal de CO<sub>2</sub> da fonte emissora de poluente (m<sup>3</sup>/s);
- $Q$  = caudal de ar de renovação (m<sup>3</sup>/s);
- $C_0$  = concentração de CO<sub>2</sub> interior no instante  $t = 0$  s (ppm);
- $V$  = volume da zona (m<sup>3</sup>).

Abaixo segue uma ilustração representando as variáveis do balanço mássico de CO<sub>2</sub> numa monozona.



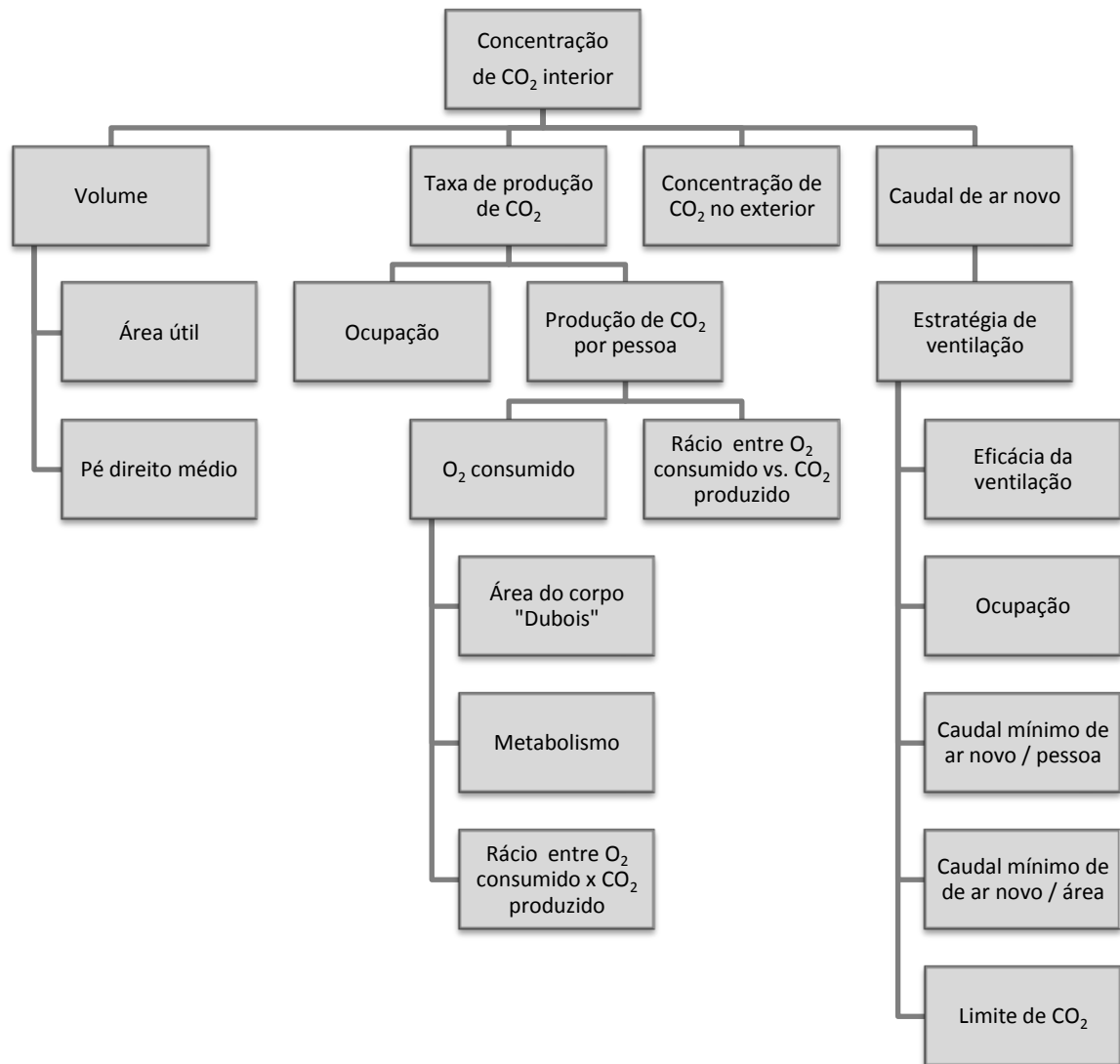
**Figura 11 - Diagrama do balanço de massa do CO<sub>2</sub> [47].**

Se não houver renovação de ar, ou seja, se o caudal de ar novo for nulo, e admitindo uma produção de CO<sub>2</sub> constante ao longo tempo, a evolução da concentração mássica de  $C_i$  no interior é obtida pela seguinte equação de equilíbrio [48]:

$$V \frac{dC_i}{dt} = S \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (19)$$

Admitindo uma concentração inicial  $C_0$ , a resolução desta equação diferencial é [48]:

$$C_i(t) = C_0 + \frac{S}{V} t \quad (\text{ppm}) \quad (20)$$



**Figura 12 - Organograma do cálculo da  $C_i$ .**

---

Os seguintes pressupostos foram assumidos para o cálculo de  $C_i$ :

- (a) O volume  $V$  é calculado pelo produto  $AP_d$ .
- (b) Para o cálculo da variável  $S$ , assume-se que  $RQ = 0,83$  e  $A_{Du} = 1,8 \text{ m}^2$ , sendo:

$$S = NS_p \quad (\text{l/s.pessoa}) \quad (21)$$

onde  $N$  = número de pessoas;

- (c) O caudal de renovação  $Q$  é determinado conforme os critérios da estratégia de ventilação adoptada, os quais são detalhados posteriormente (Capítulo 3.1.2).
- (d) A Produção de  $\text{CO}_2$  média ( $S$ ) e o caudal de ar de renovação ( $Q$ ) são constantes durante o intervalo de uma hora (este pressuposto deve-se ao facto dos padrões de referência de utilização dos edifícios estarem discriminados hora a hora no RSECE).
- (e) A actividade metabólica ( $M$ ) é constante.
- (f) A concentração de  $\text{CO}_2$  exterior ( $C_e$ ) é constante.
- (g) A zona térmica é do tipo monozona.
- (h) As condições de conforto higrotérmicas interiores estão compreendidas entre limites (máximo e mínimo) constantes.
- (i) Adoptou-se um passo de cálculo de  $t = 60 \text{ s}$ , ou seja, a concentração de  $\text{CO}_2$  é calculada a cada intervalo de 1 minuto, correspondendo a um total de 1440 valores diários. A concentração de  $\text{CO}_2$  inicial,  $C_o$ , para cada instante  $t$ , é igual a concentração final no instante  $t - 60 \text{ s}$ .

### 3.1.2 Estratégias de ventilação

Visto que as estratégias de ventilação podem influenciar significativamente a concentração dos poluentes no interior, bem como as necessidades energéticas dos edifícios, foram propostas quatro estratégias de ventilação, as quais podem diferenciar-se entre si quanto ao caudal de ar novo efectivo introduzido na zona e o período de funcionamento da ventilação. As quatro estratégias são:

- Estratégia UT (utilizador)
- Estratégia RS (RSECE)

- Estratégia AS (ASHRAE)
- Estratégia OP (otimizado)

Nas simulações, o caudal diz respeito á taxa de entrada de ar do exterior para o interior das zonas por sistemas mecânicos. As trocas de ar efectuam-se unicamente com o exterior, ou seja não existem tomadas de ar de outras divisões do edifício.

A eficácia da ventilação foi considerada nas equações de todas as estratégias para que o caudal corresponda ao fluxo de ar efectivamente introduzido no espaço ocupado.

Somente na Estratégia UT o caudal pode ser especificado pelo utilizador. Nas outras três (RS, AS e OP) o cálculo é efectuado consoante a predefinição de cada uma. A descrição da metodologia aplicada às quatro estratégias de ventilação é apresentada de seguida.

### 3.1.2.1 Estratégia UT (utilizador)

A metodologia de cálculo desta estratégia permite a introdução horária do valor do caudal para as 24 horas do dia, ou seja, o caudal de ar novo pode ser diferenciado a cada hora ao longo do dia ( $P_{\text{caudal}}$ , de 0 a 100 %), sendo esse intervalo limitado pela ventilação nula e o caudal máximo ( $Q_{\text{máx}}$ ), respectivamente.

$$Q = Q_{\text{máx}} P_{\text{caudal}} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (22)$$

onde:

$Q$  = caudal de ar de renovação ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$P_{\text{caudal}}$  = percentagem horária de caudal de ar novo em relação ao caudal máximo.

O caudal de ar novo máximo ( $Q_{\text{máx}}$ ) é calculado através do número máximo de pessoas ou pela área do edifício, sendo adoptado sempre o que resultar no maior valor:

$$Q_{\text{máx}} = \frac{N_{\text{máx}} Q_p}{E_f} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (23)$$

ou,

$$Q_{\text{máx}} = \frac{A Q_{\text{área}}}{E_f} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (24)$$

onde:

$N_{\text{máx}}$  = número máximo de pessoas (pessoas);



---

$Q_p =$  caudal mínimo horário por pessoa ( $\text{m}^3/\text{h.pessoa}$ );

$Q_{\text{área}} =$  caudal mínimo horário por área ( $\text{m}^3/\text{h.área}$ );

$E_f =$  eficácia da ventilação;

$A =$  área útil ( $\text{m}^2$ ).

### 3.1.2.2 Estratégia RS (RSECE)

Nesta opção, o cálculo do caudal de ar novo segue a obrigatoriedade do cumprimento regulamentar, através da garantia dos caudais mínimos de ar novo (Tabela 3), que constam no presente Regulamento (RSECE - DL. 2006 [2]) para projectos de novos edifícios, que sejam dotados de sistemas de climatização com ventilação mecânica. O sistema de ventilação assumido é do tipo CAV (*Constant Air Volume*), caracterizado por um caudal de ar constante durante as 24 horas do dia.

Assim como na primeira estratégia (estratégia UT), o caudal de ar novo é regido pelo número máximo de pessoas ou pela área, calculado conforme as Equações (23) e (24), prevalecendo sempre o que tiver maior valor para a conformidade regulamentar.

Outro procedimento regulamentar diz respeito aos materiais do edifício em estudo, e caso os mesmos não sejam considerados ecologicamente correctos, o caudal deve ser aumentado obrigatoriamente em 50%:

$$Q' = 1,5Q_{\text{máx}} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (25)$$

onde:

$Q' =$  caudal de ar novo corrigido devido ao tipo de material ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

### 3.1.2.3 Estratégia AS (ASHRAE)

O cálculo do caudal de ar de renovação conforme esta opção segue o procedimento VRP (Capítulo 2.4.7.1).

$$Q = \frac{N_{\text{máx}}Q_p + AQ_{\text{área}}}{E_f} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (26)$$

Portanto, caso não haja ocupação, o caudal é obrigatoriamente definido pela parcela relativa a área e a sua correspondente taxa mínima de renovação.

#### 3.1.2.4 Estratégia OP (otimizado)

Considerando que o caudal de insuflação de ar novo garante uma concentração interior de CO<sub>2</sub> de 1800 mg/m<sup>3</sup> (limite de referência), equivale equacionar a derivada de  $dC_i/dt$  da equação (3) a zero, ou seja, a  $C_i$  não varia com o  $t$ , resultando na seguinte relação:

$$Q = \frac{S}{(C_{lim} - C_e)Ef} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (27)$$

onde:

- $C_{lim}$  = concentração de CO<sub>2</sub> limite (ppm);
- $C_e$  = concentração de CO<sub>2</sub> do exterior (ppm);
- $S$  = caudal da fonte emissora de poluente (m<sup>3</sup>/h).

A taxa de produção interna de CO<sub>2</sub> é dada pela seguinte relação:

$$S = P_{ocup}S_p \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (28)$$

onde:

- $P_{ocup}$  = percentagem horária de ocupantes em relação ao número máximo de pessoas;
- $S_p$  = produção de CO<sub>2</sub> por pessoa (m<sup>3</sup>/h).

### 3.1.3 Cálculo da energia requerida associada à ventilação

O cálculo da energia referente a carga térmica necessária para aquecer ou arrefecer um ambiente interior (calor sensível) e para humidificar e desumidificar o ar (calor latente), baseia-se nas Equações (9) e (10), descritas nos Capítulos 2.6.1 e 2.6.2.

Essas necessidades energéticas são calculadas a cada hora, para os 365 dias do ano, guiada pelo intervalo de dados (hora a hora) encontrado na base de dados já referida no Capítulo 3.1.

#### 3.1.3.1 Carga térmica para aquecimento e arrefecimento

Para o calor sensível, somente é contabilizada a energia necessária caso a temperatura do ar exterior ( $T_{ext}$ ) esteja abaixo da temperatura de conforto mínima (limite inferior,  $T_{min}$ ), ou

acima da temperatura máxima interior de conforto desejada (limite superior,  $T_{\text{máx}}$ ), representando a energia de aquecimento e de arrefecimento, respectivamente.

Se a temperatura exterior ( $T_{\text{ext}}$ ) estiver no intervalo entres os limites, mínimo e máximo, a temperatura interior ( $T_{\text{int}}$ ) é definida como sendo a exterior ( $T_{\text{ext}}$ ). Assim sendo, o termo  $\Delta T$  da Equação (9) é nulo, tal como a energia sensível.

Resumindo,

$$q_s = \begin{cases} Q\rho c_p(T_{\text{mín}} - T_{\text{ext}}) & \text{se } T_{\text{ext}} < T_{\text{mín}} & \text{(aquecimento)} \\ Q\rho c_p(T_{\text{ext}} - T_{\text{máx}}) & \text{se } T_{\text{ext}} > T_{\text{máx}} & \text{(arrefecimento)} \\ 0 & \text{se } T_{\text{mín}} \leq T_{\text{ext}} \leq T_{\text{máx}} \end{cases} \quad (\text{kW}) \quad (29)$$

onde:

$Q$  = caudal de ar novo ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$\rho$  = densidade do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$c_p$  = calor específico do ar ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ );

$T_{\text{ext}}$  = temperatura do ar exterior ( $^\circ\text{C}$ );

$T_{\text{mín}}$  = temperatura de conforto mínima adoptada ( $^\circ\text{C}$ );

$T_{\text{máx}}$  = temperatura de conforto máxima adoptada ( $^\circ\text{C}$ ).

### 3.1.3.2 Carga térmica para humificação e desumificação

O teor de humidade do ar exterior ( $W_{\text{ext}}$ ) é o parâmetro determinante na contabilidade da energia associada ao calor latente. Se ( $W_{\text{ext}}$ ) for menor que o teor de humidade interior mínimo ( $W_{\text{mín}}$ ) é necessário humificar, caso ( $W_{\text{ext}}$ ) seja maior que o teor de humidade interior máximo ( $W_{\text{máx}}$ ), a necessidade passa a ser a desumificação do ar.

Ou seja,

$$q_l = \begin{cases} 3,01 \times 10^3 Q(W_{\text{mín}} - W_{\text{ext}}) & \text{se } W_{\text{ext}} < W_{\text{mín}} & \text{(humificação)} \\ 3,01 \times 10^3 Q(W_{\text{ext}} - W_{\text{máx}}) & \text{se } W_{\text{ext}} > W_{\text{máx}} & \text{(desumificação)} \\ 0 & \text{se } W_{\text{mín}} \leq W_{\text{ext}} \leq W_{\text{máx}} \end{cases} \quad (\text{kW}) \quad (30)$$

onde:

$W_{\text{ext}}$  = teor de humidade do ar exterior ( $\text{kg}$  de vapor de água /  $\text{kg}$  de ar seco);

$W_{\text{int}}$  = teor de humidade do ar interior (kg de vapor de água / kg de ar seco);

$W_{\text{mín}}$  = teor de humidade interior mínimo (kg de vapor de água / kg de ar seco);

$W_{\text{máx}}$  = teor de humidade interior máximo (kg de vapor de água / kg de ar seco).

O cálculo do consumo de energia para humidificar e desumidificar o ar

O valores de  $W_{\text{mín}}$  e  $W_{\text{máx}}$  são encontrados na aplicação da equações (31) e (32), as quais foram baseadas na equação (13) do teor de humidade.

$$W_{\text{mín}} = 0,622 \frac{P_{w,\text{mín}}}{P_{\text{atm}} - P_{w,\text{mín}}} \quad (\text{kg de vapor de água / kg de ar seco}) \quad (31)$$

e

$$W_{\text{máx}} = 0,622 \frac{P_{w,\text{máx}}}{P_{\text{atm}} - P_{w,\text{máx}}} \quad (\text{kg de vapor de água / kg de ar seco}) \quad (32)$$

onde:

$P_{\text{atm}}$  = pressão atmosférica (Pa)

Devido aos limites estabelecidos para a humidade relativa interior,  $HR_{\text{mín}}$  e  $HR_{\text{máx}}$ , obtêm-se as pressões parciais do vapor de água:

$$P_{w,\text{mín}} = HR_{\text{mín}} P_{s,\text{int}} \quad (\text{Pa}) \quad (33)$$

e

$$P_{w,\text{máx}} = HR_{\text{máx}} P_{s,\text{int}} \quad (\text{Pa}) \quad (34)$$

onde:

$P_{w,\text{mín}}$  = pressão parcial de vapor mínima no interior (Pa );

$P_{w,\text{máx}}$  = pressão parcial de vapor máxima no interior (Pa );

$P_{s,\text{int}}$  = pressão de saturação de vapor de água no interior (Pa)

$HR_{\text{mín}}$  = humidade relativa mínima adoptada

$HR_{\text{máx}}$  = humidade relativa máxima adoptada

A pressão de saturação do ar é calculada a partir da temperatura, conforme já referido na secção 2.6.2.

---

$$P_{s,int} = 2,4615T_{int}^2 + 37,1182T_{int} + 610,5 \quad (\text{Pa}) \quad (35)$$

### 3.2 Considerações finais

Conforme detalhado, as quatro estratégias de ventilação propostas, possuem um procedimento metodológico de cálculo do caudal de ar novo a ser insuflado diferenciado entre elas, que seguem recomendações normativas ou não.

O caudal de ar novo resultante em cada uma das estratégias é fundamental no resultado do cálculo da concentração de CO<sub>2</sub> e no cálculo da energia necessária para o condicionamento do ar nas condições de conforto higrotérmicas interiores.

Quanto a utilização da ferramenta para a obtenção dos resultados e concretização dos objectivos do estudo, foi proposto dois casos de estudos teóricos, os quais serão detalhados de seguida.

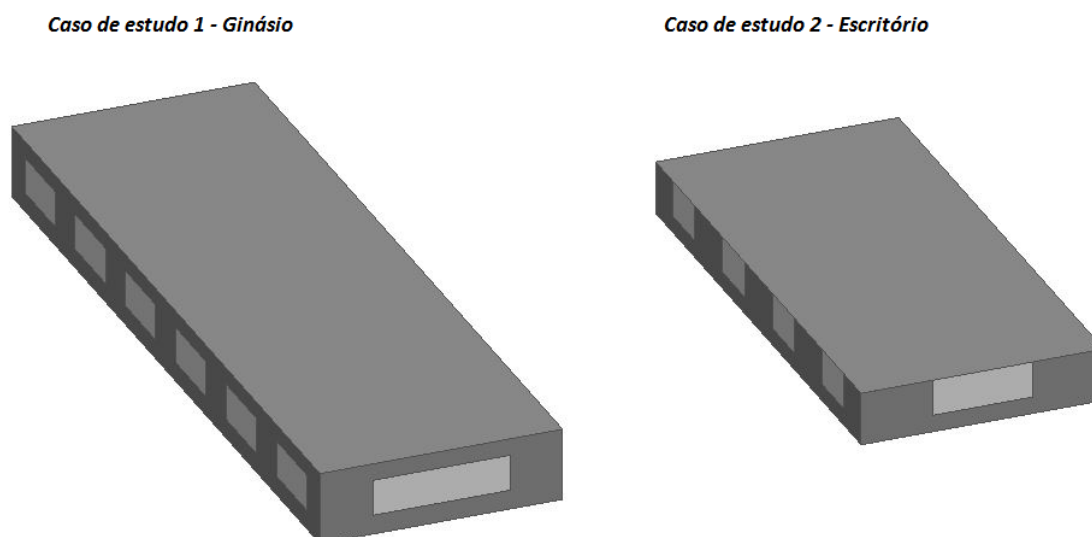
## 4 Casos de estudo

Neste Capítulo serão apresentados os casos de estudo propostos e suas respectivas características. Preocupou-se em adoptar dois edifícios de serviços com diferenças entre si quanto a tipologia geométrica, actividade física e perfis de utilização e ocupação. Essa determinação foi propositadamente colocada, com a finalidade de questionamento e discussão futura, através de resultados com maiores diferenças quando comparados.

A base para a escolha das tipologias e demais parâmetros de interesse adoptados nos dois casos de estudo, como as dimensões geométricas, o perfil de utilização e de ocupação, as zonas climáticas, os caudais de ar novo e os parâmetros comuns para ambos os casos são detalhados seguidamente.

### 4.1 Geometria e perfil de utilização

Os edifícios dos casos de estudo foram considerados monozonas, com climatização mecânica (sistemas AVAC). O edifício proposto para o primeiro caso (caso 1) possui área de pavimento e pé direito superior, e consequentemente um volume maior que o edifício do segundo caso (caso 2). As respectivas geometrias foram escolhidas aleatoriamente, e são ilustradas numa comparação em escala na Figura 13.



**Figura 13 - Representação das tipologias em 3D.**

O parâmetro determinante na escolha das tipologias foi a actividade física, justificado pelo facto de existirem diferenças significativas nas emissões de CO<sub>2</sub> interiores, ocasionadas pela respiração dos seus ocupantes. No caso 1, adoptou-se um edifício de serviço que representa um ginásio desportivo, com um valor médio da taxa metabólica correspondente a média das actividades desportivas realizadas na zona. O caso 2 representa um escritório, e portanto a taxa metabólica que está associada a essa actividade é menor que a do primeiro caso.

Na Tabela 9 são apresentados os parâmetros adoptados e os respectivos valores para cada caso.

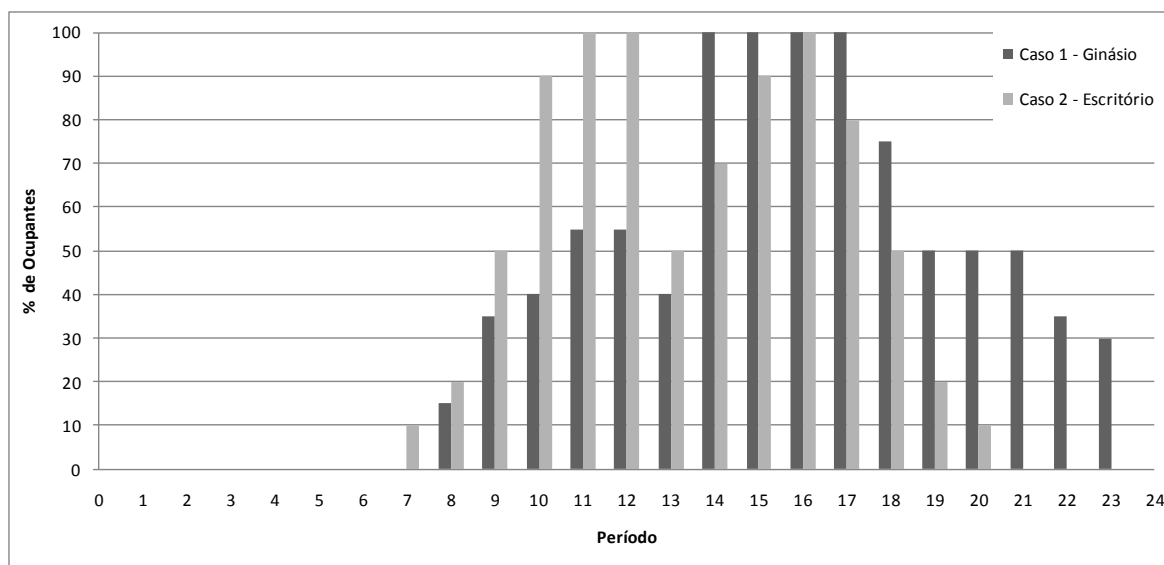
**Tabela 9 - Parâmetros de entrada e seus respectivos valores adoptados nos casos de estudo.**

Parâmetros	Valores adoptados	
	Caso 1	Caso 2
Tipologia de utilização	Ginásio	Escritório
Taxa metabólica (met)	3,5	1,2
Área de pavimento (m <sup>2</sup> )	315	210
Pé direito médio (m)	3	2,2
Volume (m <sup>3</sup> )	945	462
Densidade Ocupacional (m <sup>2</sup> /ocupante)	7	15
Número máximo de pessoas	45	14

O número máximo de ocupantes indicado é resultado da divisão entre a área de pavimento pela densidade ocupacional de referência regulamentar (Anexo 5). No caso 1, a tipologia de referência foi um clube desportivo sem piscina, na falta de uma indicação específica para ginásio.

## 4.2 Perfil de ocupação

O perfil de ocupação, com variações nas 24 h diárias, como mostra a Figura 14 foi baseado nas referências do RSECE (Anexo 5). Segundo indica o regulamento, em ambos os casos, a ocupação é tida em conta somente nos dias úteis.



**Figura 14 – Perfil de Ocupação dos casos de estudo**

Observa-se que o período de ocupação é acentuado a tarde para o ginásio, com prolongamento nocturno, quando comparado com o escritório.

### 4.3 Zonas climáticas

Para efeitos de uma melhor análise comparativa da influência da ventilação na pesquisa, optou-se pela realização das simulações em três cidades portuguesas com climas distintos – Bragança, Aveiro e Évora. Os três climas estão em zonas climáticas distintas, quando analisadas no seu conjunto Inverno e Verão, segundo a classificação do RCCTE (Tabela 10). A temperatura exterior ao longo do ano, e a sua amplitude térmica é de extrema importância em virtude do papel que desempenha no estabelecimento de fluxos energéticos: perdas e ganhos térmicos.

Bragança possui um número de graus-dias (GD) (na base 20 °C) expressivo (2850), superior ao dobro do indicado para Aveiro e Évora (1390), o que se deve ao seu rigoroso Inverno, com duração de 8 meses.

Aveiro possui um clima mais ameno do território continental [49], tanto no Inverno como no Verão, devido ao facto de estar na zona costeira central do País.

Évora está na região continental interior mais ao sul, enquadrada na zona climática de verão V<sub>3</sub>, com verões quentes. A temperatura externa de projecto indicada (35 °C) é a maior, e o Inverno possui a menor duração entre os três climas em questão.



**Tabela 10 - Distribuição dos concelhos de Portugal continental segundo as zonas climáticas e correspondentes dados climáticos de referência [10].**

Concelho	Zona climática de Inverno	Número de graus-dias (GD) (°C)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona Climática de Verão	Temperatura externa de projecto (°C)	Amplitude térmica (°C)
Bragança	I <sub>3</sub>	2850	8	V <sub>2</sub>	33	15
Aveiro	I <sub>1</sub>	1390	6	V <sub>1</sub>	29	9
Évora	I <sub>1</sub>	1390	5,7	V <sub>3</sub>	35	17

#### 4.4 Caudal de ar novo mínimo e período de ventilação

Para a estratégia de ventilação UT, determinou-se o funcionamento da renovação do ar em todos os períodos horários ocupados do edifício, independente da quantidade de pessoas. Foi ainda assumida uma hora de ventilação adicional além do último período diário ocupado, com a finalidade de possibilitar uma melhor dissipação dos poluentes acumulados durante o dia.

Os valores assumidos para os caudais mínimos de ar novo por ocupante e pela área, são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Caudais mínimos de ar novo adoptados nos casos de estudo.**

Estratégia de ventilação	Período de operação	Caso 1 - Ginásio		Caso 2 - Escritório	
		Por ocupante (m <sup>3</sup> /h.pessoa)	Pela área (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> )	Por ocupante (m <sup>3</sup> /h.pessoa)	Pela área (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> )
UT	ocupado+1hr	35	-	35	5
RS	24 horas	35	-	35	5
AS	24 horas	36	1.08	9	1.08
OP	variável	-	-	-	-

Somente há indicações dos caudais mínimos para as três primeiras estratégias (UT, RS e AS), onde as duas primeiras (UT e RS) seguem a referência do RSECE (Tabela 3). Para o caso 1 não há indicação de caudais mínimos pela área edificada. Para o escritório utilizou-se as

referências indicadas para a tipologia (Serviços - Gabinetes), com requisitos por ocupante e pela área de pavimento do edifício.

Para a estratégia RS, foi considerado que os materiais dos edifícios de ambos os casos de estudo são ecologicamente correctos, e portanto, o caudal de ar novo não sofre o aumento indicado na Equação (25).

Os caudais da estratégia AS estão em conformidade com a norma ASHRAE ST 62.1-2007 (Anexo 3 – *Occupancy Category: Office Buildings – Office space*).

Para a estratégia OP, não existe nenhuma indicação, visto que o caudal é o calculado conforme metodologia descrita no Capítulo 3.1.2.4.

### 4.5 Parâmetros comuns

Alguns parâmetros adoptados nas simulações são comuns para os dois casos de estudo:

- a área superficial corporal dos ocupantes ( $A_{Du} = 1,8 \text{ m}^2$ ), considerados adultos com estaturas médias;
- a concentração de  $\text{CO}_2$  do ar exterior adoptada foi de 380 ppm, sendo uma concentração de referência para o ar atmosférico, numa região não poluída [13];
- as temperaturas de conforto (*set point*), mínimas e máximas, seguem os valores de 20 °C e 25 °C, conforme referência do RCCTE;
- o intervalo de Humidade relativa do ar interior adoptada foi de 40 % a 60 %, considerada saudável e confortável em ambientes com controlo[50];
- a eficácia da ventilação assumida foi de 0,8. O valor assumido é equivalente a sistemas de ventilação com insuflação e extracção de ar no tecto, por exemplo (Anexo 4);
- em ambos os casos não foi considerada a presença de fumo de tabaco, devido aos contaminantes presentes no mesmo, o que acarretaria diferentes análises normativas.

---

## 5 Resultados e discussão

Neste capítulo do trabalho são apresentados os resultados obtidos através das simulações, buscando avaliar a concentração de CO<sub>2</sub> no interior e o desempenho energético através da energia requerida pela troca do ar interior do edifício pelo ar exterior, com base no perfil de ventilação diário (tempo de operação e caudal de ar novo). São realizadas avaliações e comparações entre os resultados obtidos nas 24 simulações, relativas às três regiões climáticas de Portugal – Aveiro, Bragança e Évora – para as tipologias de utilização referentes a um ambiente de ginásio e escritório (respectivamente caso de estudo 1 e 2), nas quatro estratégias de ventilação descritas nos Capítulos 3.1.2.1 a 3.1.2.4 (estratégias UT, RS, AS e OP).

Enfatiza-se que o clima não influencia os resultados do valor de  $C_i$  devido ao facto da única variável de cálculo (concentração de CO<sub>2</sub> exterior,  $C_e$ ) vinculada ao local do edifício em estudo ter sido adoptada constante para os três concelhos (380 ppm).

Seguidamente, apresenta-se os resultados da evolução temporal da concentração de CO<sub>2</sub> metabólico diária no interior ( $C_i$ ) dos dois casos de estudo propostos (Capítulos 5.1.1 e 5.1.2). Posteriormente, como resultados, serão apresentados análises comparativas das diversas simulações realizadas ao longo de todo o ano em forma de gráficos de consumo anual (Capítulos 5.2.1 a 5.2.3), e os mesmos resultados relativos as necessidades energéticas, porém numa base mensal são apresentados no Anexo 6.

### 5.1 Avaliação de $C_i$ e do caudal de ar novo

As concentrações de CO<sub>2</sub> no interior, que são apresentadas de seguida, resultam da aplicação da metodologia do estudo, cujo cálculo é baseado na Equação (18) – resolução analítica da equação diferencial do balanço de massa de CO<sub>2</sub>. Os caudais de ar novo são resultantes da metodologia de cálculo proposta nas estratégias de ventilação.

Com o intuito de uma melhor comparação e futura discussão em termos de QAI, optou-se por realizar uma análise aos casos cujos resultados de  $C_i$  ultrapassaram o limite máximo admissível de 1800 mg/m<sup>3</sup> (1000 ppm). O parâmetro comparativo adoptado foi a concentração excedida média de CO<sub>2</sub> durante o período de ocupação do edifício ( $C_{i,excesso}$ ), calculado conforme a seguinte equação:

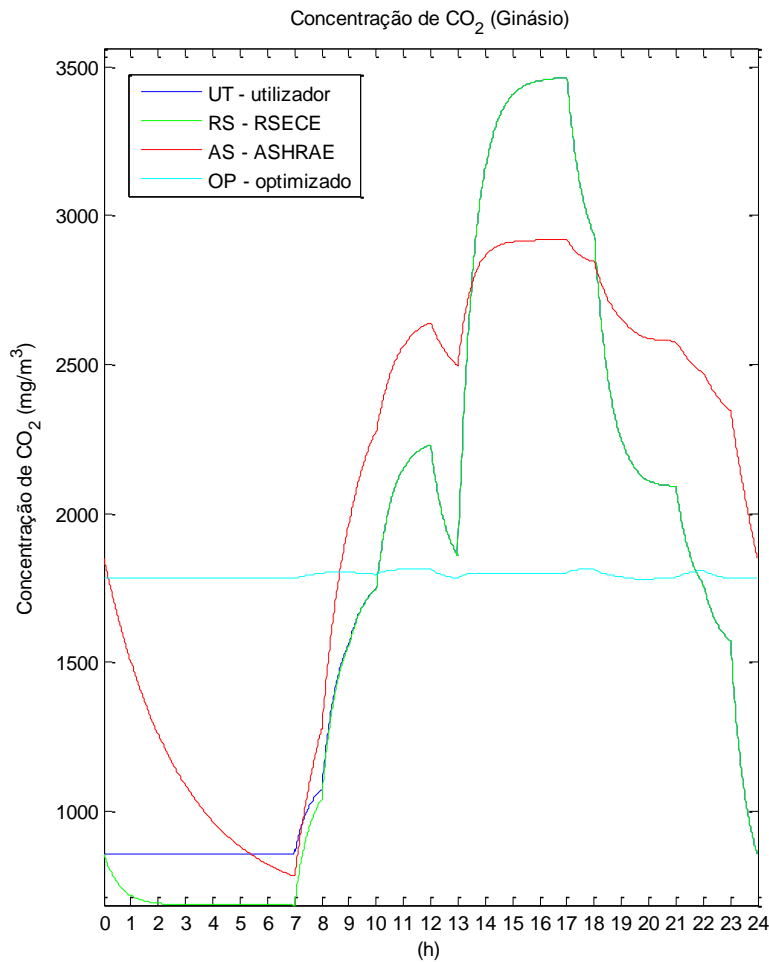
$$\int_{\text{período ocupação}} C_{i,\text{excesso}}(t) dt \quad \text{mg/m}^3 \quad (36)$$

onde:

$$C_{i,\text{excesso}}(t) = \begin{cases} C_i - C_{\text{lim}} & \text{se } C_i - C_{\text{lim}} > 0 \\ 0 & \text{se } C_i - C_{\text{lim}} \leq 0 \end{cases} \quad \text{mg/m}^3 \quad (37)$$

### 5.1.1 Caso 1 - Ginásio

Na Figura 15 são apresentados graficamente os valores das concentrações interiores de CO<sub>2</sub> obtidos nas simulações das quatro estratégias de ventilação (estratégias UT, RS, AS e OP), para o caso 1, num período de 24 horas.



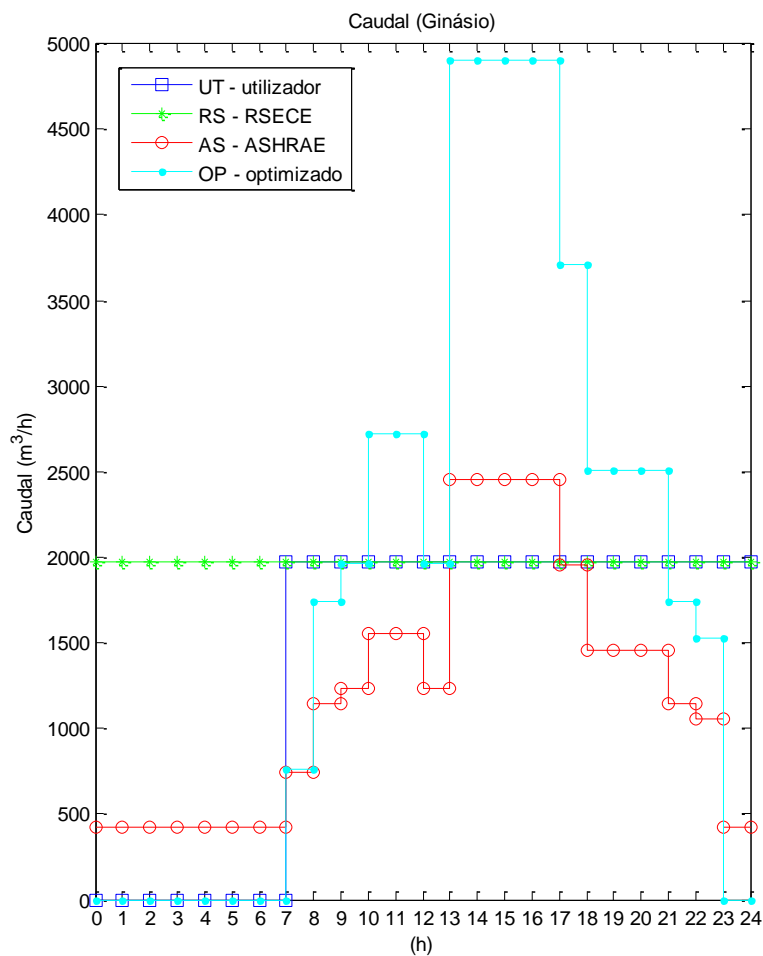
**Figura 15 - Concentração interior de CO<sub>2</sub> para o caso de estudo 1.**

Verifica-se que o valor máximo de  $C_i$  (3462 mg/m<sup>3</sup>) encontrado refere-se às duas primeiras estratégias de ventilação (UT e RS). Para a estratégia AS, o valor de pico foi de 2918 mg/m<sup>3</sup>. A

estratégia OP manteve o valor de  $C_i$  muito próximo do valor máximo de referência (1800  $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

Nas três primeiras estratégias de ventilação (UT, RS e AS) o valor de  $C_i$  excedeu o valor máximo admissível (1800  $\text{mg}/\text{m}^3$ ). O período de pico de  $C_i$  é coincidente com o período máximo de ocupação do edifício. O valor de  $C_{i,\text{excesso}}$  encontrado nas duas primeiras estratégias (UT e RS) foi de 579  $\text{mg}/\text{m}^3$ , cujo valor é inferior ao valor de  $C_{i,\text{excesso}}$  calculado na estratégia AS (753  $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

Os caudais de ar novo encontrados são apresentados de seguida na Figura 16.



**Figura 16 - Caudal de ar novo para o caso de estudo 1.**

O caudal relativo a estratégia OP apresentou o maior valor entre todas as outras estratégias, sendo o período de pico de 4905  $\text{m}^3/\text{h}$ . Nas estratégias UT e RS o caudal foi de 1968  $\text{m}^3/\text{h}$ , constante durante as vinte e quatro horas do dia para RS, e constante durante um certo período do dia para a estratégia UT.

Conforme esperado, a estratégia OP manteve um valor de  $C_i$  muito próximo do máximo de referência, através das variações do caudal de ar insuflado na zona, com a renovação máxima (pico) do volume de ar interior de  $5,2 \text{ h}^{-1}$ . Observa-se que esse caudal máximo é aproximadamente 2,5 vezes maior que o caudal/renovação de ar da estratégia RS, que foi de  $2,1 \text{ h}^{-1}$ . Para a estratégia AS a renovação representou  $2,6 \text{ h}^{-1}$  durante o pico.

No que concerne à classificação do edifício quanto a QAI, os valores de  $C_i$  encontrados nas três primeiras estratégias classificam o ginásio na pior categoria (categoria IV), com valores fora dos critérios aceitáveis, conforme a norma EN 15251 (Capítulo 2.3.8, Tabela 5).

### 5.1.2 Caso 2 - Escritório

Observa-se na Figura 17, para o escritório, que as concentrações de  $\text{CO}_2$  no interior das duas primeiras estratégias (UT e RS) estão muito abaixo do limite de referência, sendo os valores respectivos máximos de  $1128 \text{ mg/m}^3$ .

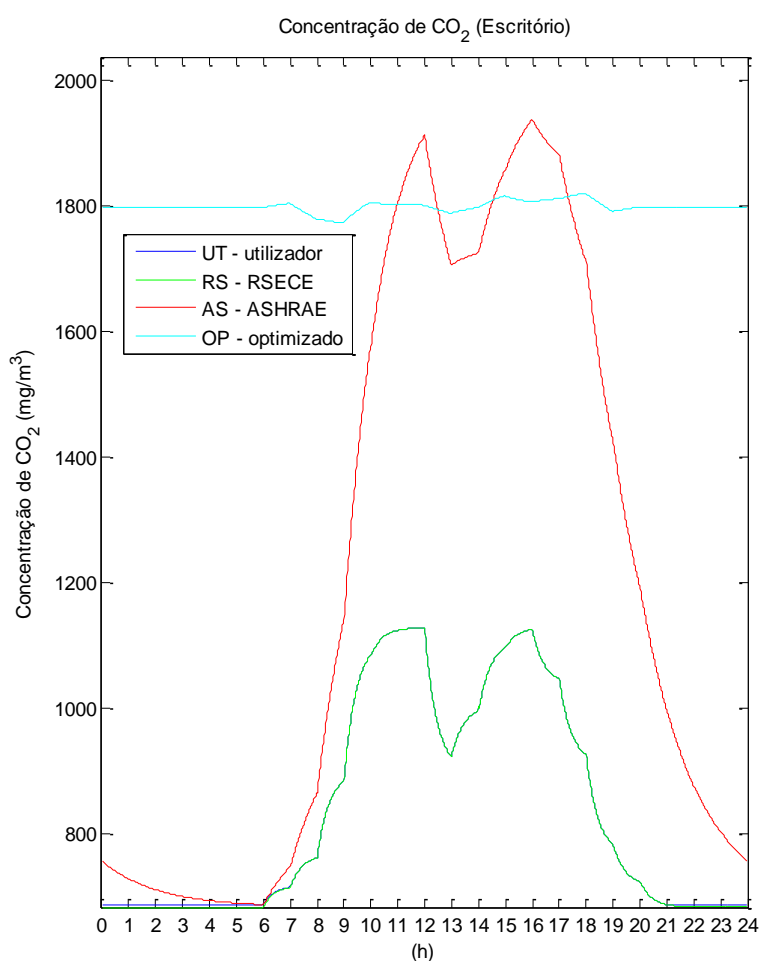
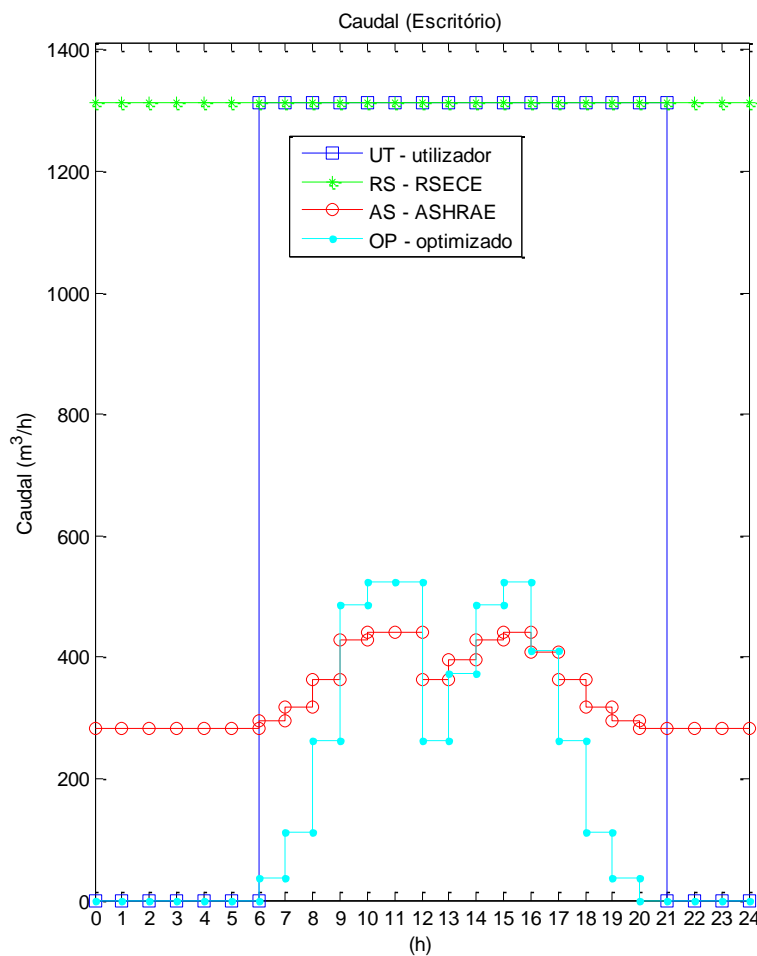


Figura 17 - Concentração interior de CO<sub>2</sub> para o caso de estudo 2.

Na estratégia AS, o valor máximo de  $C_i$  foi de 1936 mg/m<sup>3</sup>. Outra observação neste caso é que os valores de  $C_i$  ultrapassaram o limite em dois períodos do dia, sendo o valor de  $C_{i,excesso}$  de 24 mg/m<sup>3</sup>. Questiona-se se a concentração de referência deveria ser mesmo a concentração de pico, ou se poderia ser baseada numa concentração média ou de excesso médio durante o período de ocupação do edifício. Entretanto, no que diz respeito a classificação, conforme EN 15251, este caso estaria na categoria III, ou seja, teria um nível aceitável para um edifício existente.

Pela diferença da concentração de CO<sub>2</sub> interior com a exterior (304 ppm), os dois primeiros casos estão classificados na categoria I, ou seja, estão numa classificação para edifícios com alto nível de expectativa em relação a QAI, recomendado para espaços especiais (Tabela 5).

Quanto ao caudal de ar novo, verifica-se na Figura 18 um valor de 1312 m<sup>3</sup>/h para as estratégias UT e RS, e valores máximos dos caudais de 441 m<sup>3</sup>/h para a estratégia AS e 523 m<sup>3</sup>/h para a OP.



**Figura 18 - Caudal de ar novo para o caso de estudo 2.**



---

As renovações máximas do volume de ar encontradas por hora são de  $2,8 \text{ h}^{-1}$  para estratégia UT e RS. Para a estratégia AS e OP, as renovações máximas são de  $1,0 \text{ h}^{-1}$  e  $1,1 \text{ h}^{-1}$ , respectivamente.

Salienta-se que para o caso 2, os caudais das estratégias UT e RS foram determinados, para efeito de conformidade regulamentar (RSECE), pelo factor área, ou seja, prevaleceu o caudal ( $1312 \text{ m}^3/\text{h}$ ) calculado pela indicação da taxa mínima de ar pela área de pavimento. Este caudal foi 2,1 vezes maior do que o caudal calculado ( $612 \text{ m}^3/\text{h}$ ) pela componente pessoas (número máximo de pessoas previstos e respectiva taxa mínima de ar por pessoa regulamentar). Este enquadramento regulamentar contribuiu para as significativas diferenças encontradas entre as duas primeiras estratégias (UT e RS) e as duas últimas (AS e OP). Salienta-se que se os materiais não fossem considerados ecologicamente correctos o caudal seria 1,5 maior conforme requerimento regulamentar.

## **5.2 Avaliação energética**

As necessidades energéticas resultantes das simulações realizadas podem ser observadas nas Figuras 19 - 21. Os valores das necessidades energéticas apresentados estão em função da área de pavimento do edifício, numa base anual ( $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ ), para uma melhor comparação entre os casos 1 e 2. Devido essa determinação e por ser a ventilação constante durante as 24 horas, os valores relativos à estratégia RS são os mesmos em ambos os casos de estudo.

A energia útil requerida simulada é apenas um indicador da influência de diferentes estratégias de ventilação ao induzir no edifício uma carga térmica (fria ou quente) provocada pela troca de massa de ar entre o interior e o exterior. Neste estudo não foi levado em consideração outros factores, como: as perdas e os ganhos solares pela envolvente, as cargas internas, a inércia térmica do edifício, etc., os quais interagem dinamicamente num edifício e que importam ter em atenção no balanço térmico de qualquer edifício. Para uma maior aproximação da energia consumida, mantendo-se as mesmas condições de conforto interiores, é necessário um estudo mais aprofundado. Factores como: pessoas e equipamentos, são responsáveis pela libertação de calor no ambiente interior, o qual pode influenciar positivamente no inverno, contribuindo para a diminuição da carga térmica de aquecimento, entretanto, podem ser desvantajosos energeticamente no verão pelo aumento das necessidades de arrefecimento.

### 5.2.1 Necessidades energéticas em Bragança

Observa-se na Figura 19 os valores das necessidades energéticas encontradas nos casos 1 e 2 para o concelho de Bragança. O aquecimento foi o factor com maior impacto no consumo de energia. Verifica-se também uma grande diferença na energia requerida para aquecimento (148 kWh/m<sup>2</sup>.ano) resultante da estratégia RS, quando comparado com as demais estratégias (UT, AS e OP).

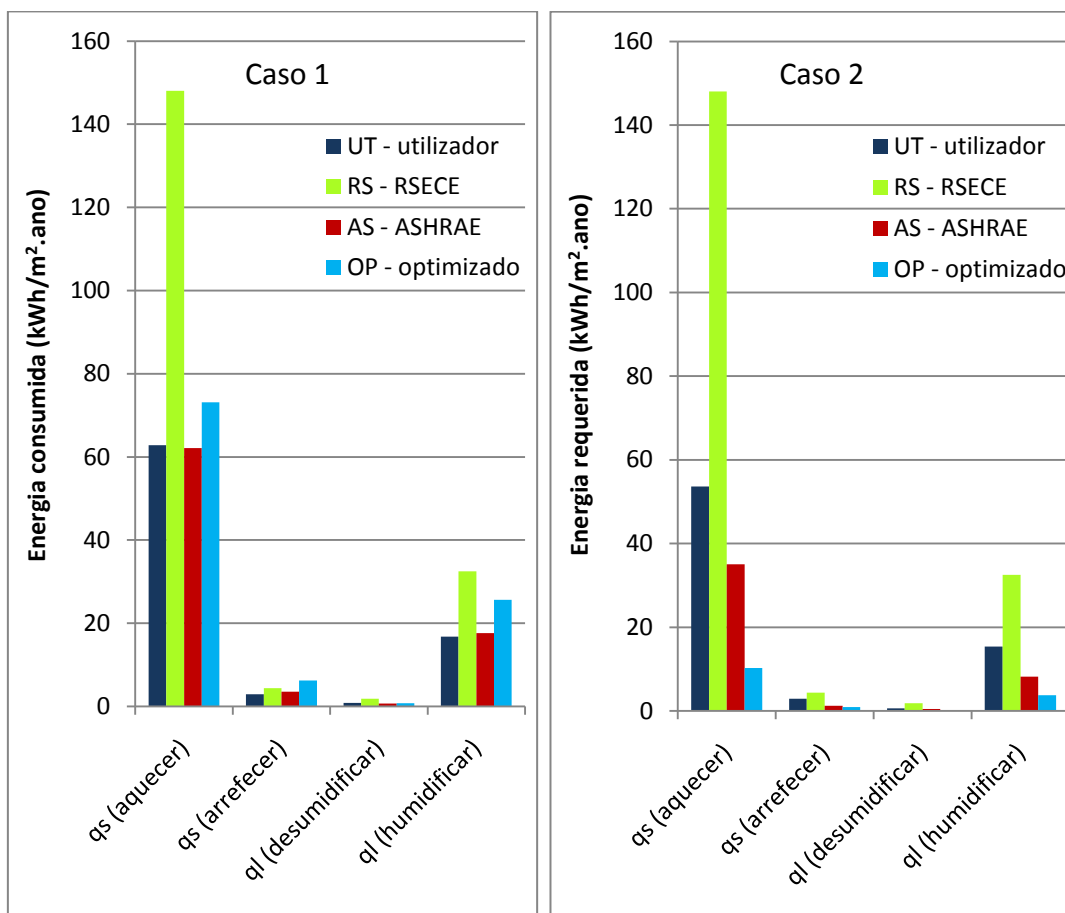


Figura 19 - Necessidades energéticas anuais para Bragança.

Após o aquecimento a segunda maior necessidade energética foi a humificação, com o valor máximo de 32 kWh/m<sup>2</sup>.ano na estratégia RS.

Para o ginásio (caso 1), a estratégia OP requer 73 kWh/m<sup>2</sup>.ano para aquecimento, cujo valor é maior que o valor encontrado nas estratégias UT e AS (63 e 62 kWh/m<sup>2</sup>.ano). Entretanto, realça-se que a estratégia OP foi a única em que a  $C_i$  permaneceu dentro da condição limite de CO<sub>2</sub> adoptada, como já referido anteriormente.

Para o escritório (caso 2) nota-se diferenças significativas no consumo de energia entre as quatro estratégias de ventilação. O maior diferencial encontrado foi entre a opção RS e OP, com valores de 148 kWh/m<sup>2</sup>.ano e 10 kWh/m<sup>2</sup>.ano, respectivamente, para as necessidades de aquecimento.

### 5.2.2 Necessidades energéticas em Aveiro

Para o concelho de Aveiro (Figura 20) observa-se que a energia requerida para o aquecimento também foi relevante (máximo de 120 kWh/m<sup>2</sup>.ano), porém foi menor que o valor máximo encontrado no concelho de Bragança. O segundo maior factor com necessidades energéticas em Aveiro foi a desumidificação, com valores máximos de 17 kWh/m<sup>2</sup>.ano para RS.

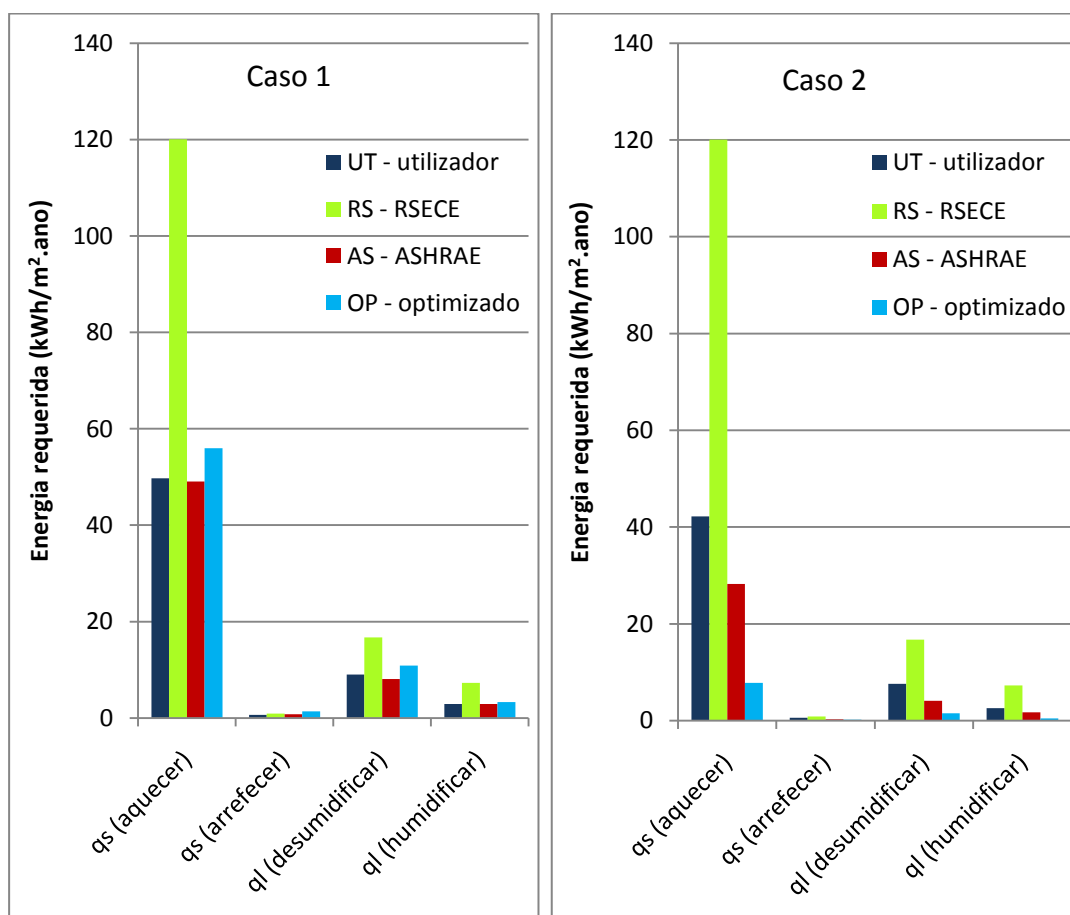


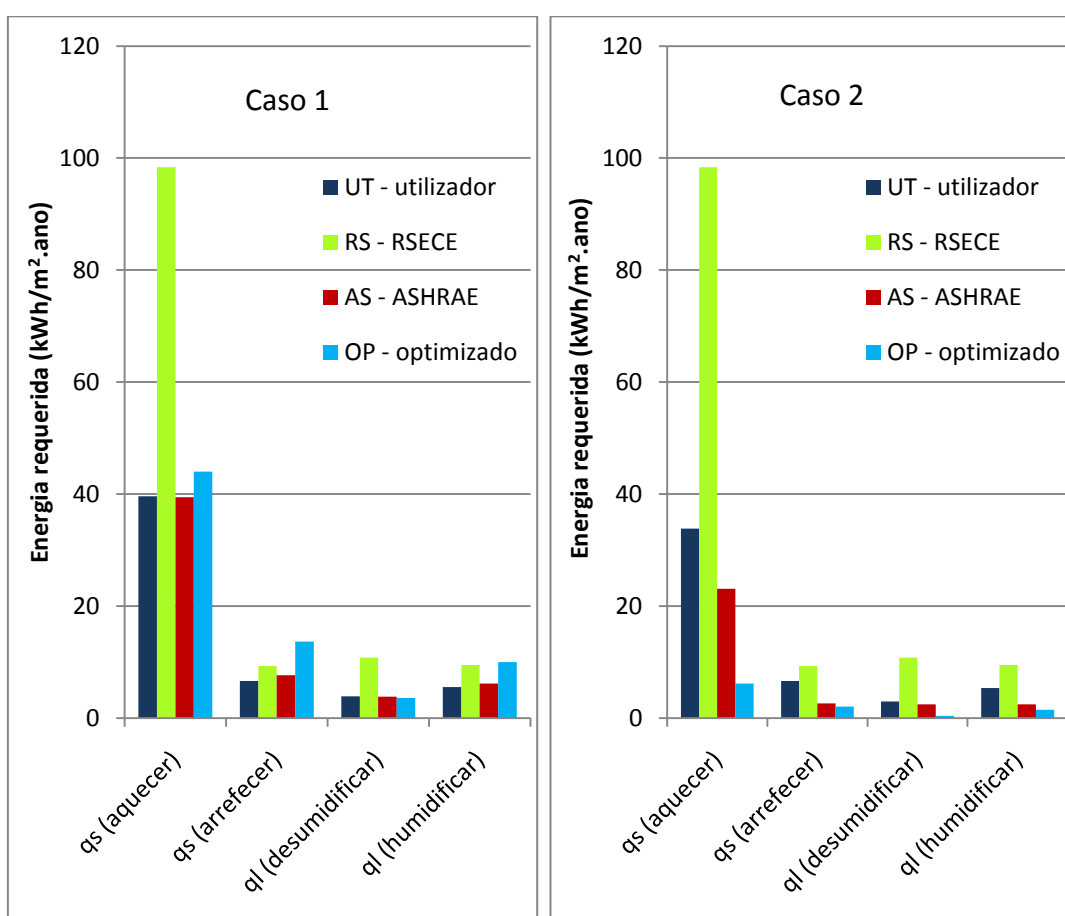
Figura 20 - Necessidades energéticas anuais para Aveiro.

Para o escritório observa-se uma maior diferença nas necessidades energéticas de aquecimento entre diferentes estratégias, quando comparadas com o ginásio. Na estratégia AS a energia necessária é de 28 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o aquecimento no escritório; este valor é

1,5 vezes menor que na estratégia UT, e 4,2 vezes menor que na RS, porém, é 3,6 vezes maior que na estratégia OP.

### 5.2.3 Necessidades energéticas em Évora

Na Figura 21, para Évora, verifica-se que a necessidade energética relevante também é o aquecimento. Contudo o maior valor encontrado foi de 98 kWh/m<sup>2</sup>.ano, que é menor que nos demais concelhos estudados. Observa-se um maior equilíbrio entre as necessidades energéticas para arrefecer, desumidificar e humidificar comparativamente a Aveiro e Bragança.



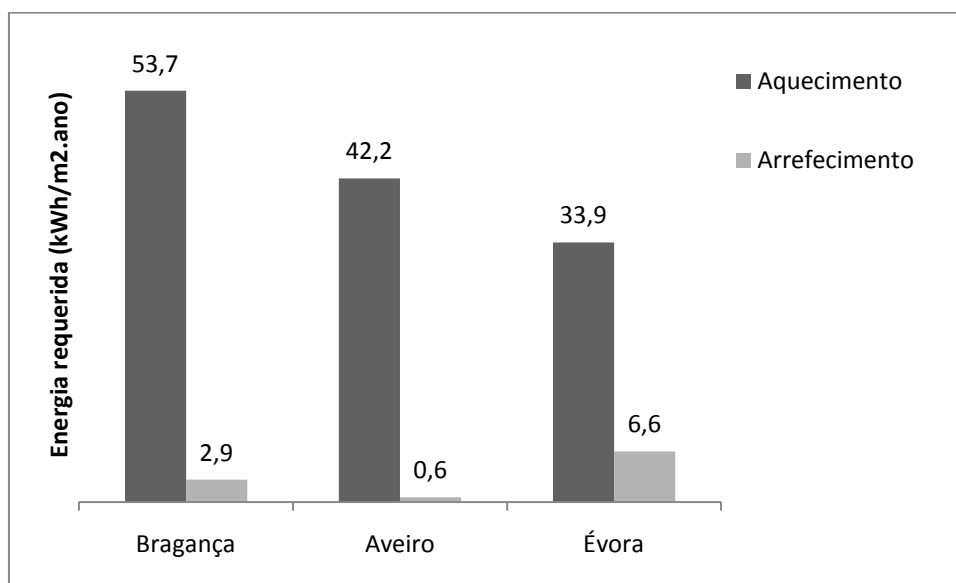
**Figura 21 - Necessidades energéticas anuais para Évora.**

As necessidades de arrefecimento são maiores que em Bragança e em Aveiro, coerente com o clima, devido ao concelho de Évora estar classificado numa zona climática de verão mais acentuada (V<sub>3</sub>).

Para o caso 2 (escritório), a estratégia de ventilação otimizada foi a que apresentou o melhor desempenho energético e possibilitou manter um nível de concentração de CO<sub>2</sub> próximo do limite referência, em todos os climas. A otimização dos sistemas de ventilação pode ser alcançada através da utilização de sistemas de ventilação DCV (Capítulo 2.4.7.2), especialmente em edifícios com grandes variações no perfil de ocupação. Entretanto, na aplicação prática, o sistema otimizado deverá estar preparado para atender às grandes variações dos caudais exigidos.

Na Figura 22, destaca-se comparativamente as necessidades de aquecimento e arrefecimento do caso de estudo 2 e estratégia UT. Tal como referido anteriormente, o tempo de operação deste caso simulado segue o período de ocupação, e mais uma hora adicional depois do último horário ocupado. O caudal dimensionado seguiu as recomendações de taxas mínimas de ar novo pelo RSECE.

As necessidades energéticas de arrefecimento encontradas acompanharam a gradação das zonas climáticas de Portugal, sendo de 0,6 kWh/m<sup>2</sup>.ano para Aveiro (V<sub>1</sub>), 2,9 kWh/m<sup>2</sup>.ano para Bragança (V<sub>2</sub>), e 6,6 kWh/m<sup>2</sup>.ano para Évora (V<sub>3</sub>), conforme observa-se na Figura 22.



**Figura 22 - Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para o caso de estudo 2 com a estratégia de ventilação UT.**

No entanto, tal como é possível observar na mesma Figura 22, a maior parte das necessidades de climatização, nos climas estudados, referem-se ao aquecimento do edifício: 53,7

kWh/m<sup>2</sup>.ano para Bragança (I<sub>3</sub>), 42,2 kWh/m<sup>2</sup>.ano para Aveiro (I<sub>1</sub>), e 33,9 kWh/m<sup>2</sup>.ano para Évora (I<sub>1</sub>).

Apesar de possuírem a mesma indicação no regulamento quanto ao número de GD, as necessidades de aquecimento de Aveiro foram maiores do que as encontradas em Évora. A justificação deste facto pode passar pela diferença de temperaturas entre os dois concelhos no período de funcionamento da ventilação.

### 5.3 Análise comparativa dos casos de estudo

Através da análise dos casos simulados, pode-se observar que, dependendo da actividade física do edifício, o caudal efectivo de ar novo, dimensionado pelos caudais mínimos regulamentares ou normativos, pode não ser suficiente para diluir o CO<sub>2</sub> metabólico até o nível máximo admissível de referência (1800 mg/m<sup>3</sup>).

Como se verifica no caso 1 estudado (ginásio), um edifício com actividade física alta (3,5 met), o caudal de ar novo calculado, tanto pelos requerimentos RSECE como da ASHRAE, não conseguiu dissipar o CO<sub>2</sub> produzido pelas pessoas até o nível de concentração de referência. Neste edifício o pico da concentração de CO<sub>2</sub> foi 92 % superior ao limite, com o caudal de ar novo dimensionado pela taxa mínima estabelecida pelo RSECE.

**Tabela 12 - Síntese dos resultados encontrados para os casos 1 e 2 no concelho de Bragança.**

<b>Estratégia de ventilação</b>	<b>C<sub>i</sub> máxima (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C<sub>i,excesso</sub> (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Renovações por hora máximas (h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Necessidades de aquecimento (kWh/m<sup>2</sup>.ano)</b>	<b>Categoria</b>
<b>Caso 1 – Ginásio</b>					
UT	<b>3462</b>	579	2,1	63	<b>IV</b>
RS	<b>3462</b>	579	2,1	148	<b>IV</b>
AS	2918	753	2,6	62	IV
OP	1814	0	5,2	73	III
<b>Caso 2 – Escritório</b>					
UT	1128	0	2,8	<b>54</b>	<b>I</b>
RS	1128	0	2,8	<b>148</b>	<b>I</b>
AS	1936	24	1,0	35	III
OP	1819	0	1,1	10	III

---

Inversamente, no caso 2 (escritório), verificaram-se concentrações mais baixas de CO<sub>2</sub> no interior, o que leva a conclusão de uma ventilação elevada. Neste caso, os valores dos caudais de ar novo prescritos no RSECE para a referida tipologia, com actividade física leve (1.2 met), são muito altos quando comparados com outras recomendações (ASHRAE e EN 15251). Verifica-se também que as necessidades energéticas são maiores seguindo as taxas mínimas recomendadas pelo RSECE, quando comparado com as taxas e metodologia da norma ASHRAE, conforme abordagem supra citada, ou seja, somente pela troca do volume mássico do ar interior pelo ar atmosférico.

O aquecimento ambiente revelou-se como a maior necessidade energética encontrada em ambos os casos (ginásio e escritório), sendo o maior valor de 148 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o concelho de Bragança com a estratégia de ventilação RS (RSECE). A explicação desse facto pode ser dada pela influência na carga térmica do edifício pelo sistema de ventilação – caudal de renovação do ar e período de operação constante (24 horas), nas condições climáticas locais, com um inverno severo (zona climática I<sub>3</sub>).

Em suma, verifica-se de uma maneira geral para ambos os casos de estudo que:

- a estratégia de ventilação RS (RSECE) é a que apresentou maiores necessidades de energia nos três climas;
- as necessidades energéticas de aquecimento, para a manutenção da temperatura do ar interior, são significativamente superiores às outras necessidades (arrefecimento, desumidificação e a humedificação);
- o concelho de Bragança foi o que apresentou maiores requerimentos de energia numa base anual, devido às elevadas perdas de energia durante o seu inverno rigoroso (definido para esta região como zona climática de Inverno I<sub>3</sub>).

## **5.4 Considerações finais**

Observa-se no RSECE um tratamento pouco diferenciado quanto a recomendação das taxas mínimas de ventilação para diferentes tipologias de edifícios, não levando em conta as características dos ocupantes e a diversidade na emissão de CO<sub>2</sub> pelas pessoas e suas actividades metabólicas. Esse facto gera um desequilíbrio com consequências na QAI e no consumo de energia. A norma ASHRAE possui uma maior diferenciação nas recomendações dos caudais mínimos para diferentes tipologias, como pode ser observado nos casos de estudo.

As taxas mínimas indicadas no regulamento poderiam ser até 2,5 vezes menores para a dissipação do CO<sub>2</sub> metabólico produzido num espaço até o nível de referência. Foi realizado uma nova simulação (simulação UT<sub>-2,5x</sub>) com o valor do caudal de 525 m<sup>3</sup>/h, ao invés de 1312 m<sup>3</sup>/h, a qual resultou numa poupança energética de 60 % comparativamente com a estratégia UT, com uma concentração de CO<sub>2</sub> máxima abaixo do limite de referência, conforme mostra a Tabela 13.

**Tabela 13 – Comparação de resultados para o caso 2 com estratégia UT e UT<sub>-2,5x</sub>**

Estratégia de ventilação	C <sub>i</sub> máxima (mg/m <sup>3</sup> )	C <sub>i,excesso</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	Renovações por hora máximas (h <sup>-1</sup> )	Necessidades de aquecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Categoria
<b>Caso 2 – Escritório</b>					
UT	1128	0	2,8	54	I
UT <sub>-2,5x</sub>	1738	0	1,1	21	III

Para satisfazer a qualidade do ar pela percepção dos ocupantes, estima-se que um terço da taxa de ventilação é suficiente, ou seja, para a categoria II, conforme o exemplo apresentado na Tabela 7, a taxa recomendada seria de 2,5 l/s.pessoa (9 m<sup>3</sup>/h.pessoa) em vez de 7,5 l/s.pessoa (27 m<sup>3</sup>/h.pessoa = Q<sub>p</sub> × densidade ocupacional) [40]. A norma ASHRAE 62 possui boas indicações de taxas mínimas de ventilação por ocupantes, como se verificou nos caudais mínimos recomendados para o caso 2 estudado.

O caudal de ar novo dimensionado pelas taxas mínimas recomendadas pelo RSECE, em edifícios cujos ocupantes possuem taxa metabólica acima de 1,2 met, poderá não ser suficiente para cumprir com as exigências regulamentares em termos de QAI (concentrações de CO<sub>2</sub>) na fase de operação.

Propõe-se uma fórmula de cálculo do caudal de ar novo necessário (Q<sub>nec</sub>) para manter uma concentração de CO<sub>2</sub> interior abaixo do limite (C<sub>lim</sub>), baseada no método optimizado (Equação (27) – Capítulo 3.1.2.4) e na produção de CO<sub>2</sub> pelas pessoas (Equações (4) e (5) – Capítulo 2.4.4), conforme descrito anteriormente.

$$Q_{nec} = \frac{\frac{N_{m\acute{a}x} 0,00276 A_{Du} M RQ3,6}{(0,23RQ + 0,77)}}{(C_{lim} - C_e)Ef} \quad (m^3/h) \quad (38)$$

onde:



- 
- $N_{\text{máx}}$  = número máximo de pessoas;
- $A_{\text{Du}}$  = área de superfície do corpo média (área de DuBois) ( $\text{m}^2$ );
- $M$  = taxa metabólica (met);
- $RQ$  = rácio da taxa volumétrica entre  $\text{O}_2$  consumido e o  $\text{CO}_2$  produzido;
- $C_{\text{lim}}$  = concentração de  $\text{CO}_2$  limite admissível (ppm);
- $C_e$  = concentração de  $\text{CO}_2$  do exterior (ppm);
- $E_f$  = eficácia da ventilação;

Para o cálculo da área média de superfície do corpo utiliza-se a seguinte equação:

$$A_{\text{Du}} = 0,203 A_l^{0,725} P_e^{0,425} \quad (\text{m}^2) \quad (39)$$

onde:

- $A_l$  = altura média do corpo (m);
- $P_e$  = peso médio do corpo (kg).

A Equação (38) pode ser simplificada assumindo os seguintes valores típicos  $RQ = 0,83$ ,  $A_{\text{Du}} = 1,8 \text{ m}^2$ ,  $E_f = 0,8$ ,  $C_{\text{lim}} = 0,001 \text{ ppm}$  e  $C_e = 0,00038 \text{ ppm}$ , resultando na seguinte expressão:

$$Q_{\text{nec}} = 31,15 N_{\text{máx}} M \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (40)$$

Portanto, com a introdução somente da lotação máxima prevista e a respectiva taxa de metabolismo média dos ocupantes (Tabela 14) na Equação (40)<sup>2</sup>, obtêm-se um caudal referência para o dimensionamento da ventilação.

---

<sup>2</sup> Assume-se no cálculo: ocupantes adultos com área corpórea média, sistema de ventilação com eficácia intermediária, concentração de  $\text{CO}_2$  no exterior de referência e concentração máxima interior de  $\text{CO}_2$  indicada no RSECE.

Tabela 14 - Tipo de actividade e respectiva taxa metabólica.

<b>Tipo de actividade</b>	<b>Taxa de metabolismo dos ocupantes (met)</b>	<b>Exemplos de tipo de espaço</b>
Sono	0,8	Quartos, dormitórios e similares
Descanso	1	Salas de repouso, salas de espera, salas de conferência, auditórios e similares
Sedentária	1,2	Escritórios, gabinetes, secretarias, salas de aula, biblioteca, cinemas, salas de espectáculos, salas de refeições, lojas e similares
Moderada	1,4 a 2,0	Laboratórios, ateliers, salas de desenho e trabalho oficiais, cafés, bares, salas de jogos e similares
Ligeiramente Alta	2,0 a 3,0	Pistas de dança, salas em ginásios, salas de ballet e similares
Alta	3,0 a 9,0	Salas de musculação, salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares

A ferramenta de simulação desenvolvida no estudo permite obter resultados que podem servir de referência para a operação de sistemas de ventilação existentes, assim como, auxiliar o dimensionamento da ventilação de novos edifícios, tendo sempre como base o CO<sub>2</sub>, um indicador da ventilação e da QAI. Através dessa ferramenta é possível obter resultados que podem servir de base para a entrada de dados noutras ferramentas computacionais mais complexas, como as que realizam simulações dinâmicas (por exemplo, o *software Energyplus* [51]). A vantagem das simulações dinâmicas é avaliar com maior rigor as condições de conforto térmico e o desempenho energético de edifícios construídos e futuras construções, possibilitando assim, a visualização de alternativas fiáveis para aumentar a eficiência energética dos edifícios.

As necessidades energéticas para a climatização dependem de numerosos factores, alguns dos quais variáveis ao longo do dia, tal como a radiação solar incidente e a ocupação. Os factores que têm maior impacte nas necessidades energéticas são:

- efeitos da radiação solar através das superfícies transparentes;
- efeitos da transferência de calor por condução através de superfícies opacas;
- inércia térmica do edifício;

- 
- cargas térmicas internas, tanto sensíveis como latentes, devido à presença de pessoas e fontes produtoras de calor (tais como iluminação, maquinaria, etc.).

O cálculo das necessidades energéticas devido a carga térmica, sensível e latente, pela renovação do ar, conforme metodologia do presente estudo, pode ser representativo na carga total de edifícios com baixa densidade ocupacional (edifícios residenciais, hotéis, hospitais, etc.). Em edifícios com alta densidade ocupacional, as cargas térmicas dos ocupantes possuem um peso significativo no balanço térmico, e consequentemente no consumo de energia para a climatização do edifício.

Conforme referido anteriormente, o cumprimento do limite máximo admissível de 1800 mg/m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> no interior está associado somente a percepção dos ocupantes do edifício quanto os cheiros incómodos (bioefluentes do ambiente interior) [16]. O caudal calculado pela componente ocupação (taxa mínima de ar por pessoa) poderá ainda ser aumentado devido a emissões provenientes de fontes do edifício, independentes da ocupação, como no caso especificado pela norma ASHRAE e pela EN 15251. Segundo Olesen [40], não há uma concordância quanto a contribuição da totalidade da taxa pela área edifício, no caudal efectivo de ar novo. Vários estudos indicam que essa é a melhor aproximação, entretanto pode não ser válida para todo tipo de poluentes.

Enquanto a concentração de CO<sub>2</sub> interior demonstra ser um indicador confiável da aceitabilidade de um espaço em termos de odor de corpo humano, assim como, ser um indicador da ventilação pela análise de equilíbrio, o CO<sub>2</sub> deve ser utilizado com precaução na garantia global da QAI.

## 6 Conclusões e perspectivas futuras

A realização da presente dissertação teve como objectivo central o estudo teórico de estratégias de ventilação de forma a verificar a evolução temporal da concentração de CO<sub>2</sub> metabólico. Para além disso, pretendia-se avaliar a energia necessária para manter as condições de conforto desejadas, dada a renovação do ar interior e a consequente introdução de carga térmica em edifícios.

No âmbito do trabalho foram atingidos objectivos que permitiram:

- realizar um levantamento da normalização internacional e regulamentação nacional aplicáveis a QAI e aos sistemas de ventilação, especialmente os caudais mínimos recomendados para os edifícios de serviços pelo regulamento vigente (RSECE) em Portugal, e pela norma americana (ASHRAE);
- analisar a evolução temporal da concentração do CO<sub>2</sub> metabólico interior através da análise de equilíbrio e balanço mássico de CO<sub>2</sub> em diferentes estratégias de ventilação;
- avaliar a influência da troca do ar interior pelo ar exterior na carga térmica dos edifícios, dado um caudal de renovação de ar num determinado clima.

As actuais normas e regulamentos estabelecem taxas de ventilação mínimas a fim de proteger a saúde humana e evitar o consumo excessivo de energia em edifícios. Quanto à regulamentação Portuguesa (RSECE [2]) e normalização internacional estudada (ASHRAE [16]), pode-se afirmar o seguinte:

- a normalização internacional recomenda, em média, caudais mínimos de ar novo para a renovação do ar interior inferiores aos recomendados pelo RSECE. Como verificado num caso de estudo, a diferença é significativa, sendo a indicação pelo RSECE aproximadamente 4 vezes maior que a dada pela ASHRAE (35 m<sup>3</sup>/h.pessoa vs. 9 m<sup>3</sup>/h.pessoa)
- o método de cálculo prescritivo do caudal de ar novo pela ASHRAE é diferente do RSECE, por levar em conta a soma das taxas mínimas de ar novo para poluentes relacionados com a ocupação e com os provenientes do próprio edifício;
- a norma Americana possui indicações de caudais mínimos para um maior número de edifícios consoante as suas tipologias de utilização;

- 
- o RSECE não admite, diferentemente do que é permitido na norma Americana, o dimensionamento de sistemas de ventilação que são projectados para redefinir o caudal de ar novo, alterando as condições de operação do sistema (ajustes dinâmicos).

Conclui-se que existe pouca diferenciação nos requisitos mínimos de ventilação estabelecidos pelo RSECE para os edifícios com suas diferentes tipologias. Um desequilíbrio com consequências na QAI e no consumo de energia é gerado devido ao regulamento não levar em conta a variação na produção de CO<sub>2</sub> pelos ocupantes, através da diversidade das características das pessoas e de suas actividades metabólicas.

O caudal de ar novo, dimensionado pelas indicações de taxas mínimas do RSECE, pode não ser suficiente para se obter uma QAI aceitável (tendo como referencial o nível de CO<sub>2</sub>) no interior de edifícios com actividades metabólicas elevadas.

Observou-se no primeiro caso de estudo que a concentração de CO<sub>2</sub> máxima foi 92 % maior que a concentração limite de referência. Noutros casos, na presença de actividades metabólicas mais leves, pode ocorrer a hiperventilação e o consequente consumo excessivo de energia, tal como foi verificado no segundo caso de estudo. Nesse caso, o caudal de ar novo poderia ser até 2,5 vezes menor, levando em consideração somente a dissipação do CO<sub>2</sub> metabólico até um nível de concentração de referência. Por sua vez, esta redução resultaria numa poupança de 60 % das necessidades energéticas associadas à renovação do ar interior.

As simulações realizadas indicaram a relevância do aquecimento, como principal necessidade energética no condicionamento do ar interior, para as condições de conforto desejadas (temperatura e humidade relativa do ar), devido somente à renovação do ar interior em climas Portugueses, sem avaliar a influência de outros factores no balanço térmico do edifício. A estratégia de ventilação optimizada apresentou melhores resultados quanto ao requerimento de energia, atendendo sempre a um determinado limite da concentração de CO<sub>2</sub> no interior.

Num dos casos simulados (escritório com estratégia de ventilação UT), verificou-se que as necessidades de aquecimento encontradas para Bragança são 21 % superiores às simuladas para Aveiro, e 37 % superiores às realizadas para Évora. Comparando as necessidades de aquecimento com as de arrefecimento, observa-se que o aquecimento representa 95 %, 99 % e 84 % das necessidades totais (aquecimento e arrefecimento) para o concelho de Bragança, Aveiro e Évora respectivamente. Este facto reforça a influência do clima na carga térmica do

edifício, de forma gradativa, conforme as zonas climáticas estudadas; bem como a predominância das necessidades de aquecimento.

Em futuras revisões do regulamento Português (RSECE) sugere-se a introdução do método analítico como possibilidade de cálculo da ventilação, como já é permitido na norma ASHRAE, com o intuito da optimização dos sistemas de ventilação. No método prescritivo de cálculo indica-se a possibilidade de diferenciação dos caudais mínimos de ar novo em diferentes categorias quanto aos níveis de exigência, e a indicação da consequente classificação do edifício em termos da QAI. Uma diferenciação maior, conforme a actividade metabólica, também poderia ser feita para que os caudais mínimos indicados resultem numa maior aproximação da garantia da QAI, pela concentração de CO<sub>2</sub> no interior.

A qualidade do ar interior é um aspecto importante na concepção, construção e gestão de edifícios, sendo uma das componentes da qualidade do ambiente interior e uma das vertentes da sustentabilidade. Assim sendo, a tentativa de equilibrar a saúde e o bem-estar dos ocupantes, através da ventilação com garantias da qualidade do ar interior, e o uso eficiente de energia, deverá ser sempre feita no projecto de edifícios.

### 6.1 Propostas para trabalhos futuros

Apesar de ser possível, pelo método desenvolvido, obter uma estimativa do CO<sub>2</sub> no interior de edifícios tipologicamente variáveis, melhores resultados podem ser alcançados com o aperfeiçoamento da ferramenta. A introdução de novos parâmetros, como as condições antropométricas dos ocupantes (a idade e a altura, e respectivas emissões de CO<sub>2</sub>), permitiria uma maior aproximação do nível de concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente interior, abrangendo um maior número de tipologias de estudo, como por exemplo, edifícios com espaços ocupados maioritariamente por crianças. A possibilidade de introdução de dados, como o caudal e a ocupação, com uma resolução inferior à horária, assim como a possibilidade de diferenciação do perfil de ocupação entre os dias úteis e entre os meses do ano, acrescentariam valor ao *software* desenvolvido.

No contexto da análise energética, recomenda-se: acrescentar a poupança de energia através de recuperadores de calor e economizadores; a quantificação da energia consumida pelos equipamentos AVAC nos processos de condicionamento do ar; e principalmente adicionar a inércia térmica e as cargas interiores (latente e sensível) no balanço térmico.

---

Numa pesquisa futura, sugere-se ainda, no âmbito do trabalho desenvolvido, a elaboração de um módulo de cálculo complementar, que permita realizar o processo inverso (regressão não-linear), ou seja, através do balanço mássico e a evolução temporal do CO<sub>2</sub>, que determine a renovação do ar interior em edifícios.

Devido a algumas dificuldades encontradas na prática para se obter a renovação do ar em ambientes interiores, como por exemplo em sistemas de ventilação que possuem uma parcela de renovação e outra de recirculação de ar. Devido à obrigação da comprovação de conformidade regulamentar quanto à renovação do ar, essa ferramenta seria de grande importância no auxílio à peritagem de edifícios, nomeadamente ao nível da fase de auditoria QAI para a obtenção de licença ou autorização de utilização e certificado QAI.

Outra sugestão para trabalho futuro é a realização de testes práticos ao nível do CO<sub>2</sub> no interior de edifícios, assim como a possível validação da ferramenta desenvolvida.

## Bibliografia e referências

1. IPCC, *Fourth Assessment Report: Climate Change*. 2007, The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
2. Decreto Lei 79/2006 de 4 de Abril, *Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE)*. 2006: Lisboa, Portugal.
3. *Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (EPBD) - 2002/91/EU*. 2002.
4. *Balçoço Energético Nacional*. 2007, Direcção-Geral de Energia e Geologia - DGEG.
5. Isolani, P., *A utilização racional de energia em edifícios públicos*. 2008, EnerBuilding: Lisboa.
6. Decreto Lei 40/90 de 6 de Fevereiro, *Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE)*. 1990: Lisboa, Portugal.
7. Decreto Lei 156/92 de 29 de Julho, *Regulamento da qualidade dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RQSECE)*. 1992: Lisboa, Portugal.
8. Decreto Lei 118/98 de 7 de Maio, *Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE)*. 1998: Lisboa, Portugal.
9. Decreto Lei 78/2006 de 4 de Abril, *Sistema nacional de certificação energética e da qualidade do ar interior nos edifícios (SCE)*. 2006: Lisboa, Portugal.
10. Decreto Lei 80/2006 de 4 de Abril, *Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE)*. 2006: Lisboa, Portugal.
11. ADENE. 13/10/2010]; Available from: <http://www.adene.pt/>.
12. CHS, *The Code for Sustainable Homes* 2006: London.
13. Alfano, F.R.d.A., et al., *Ambiente Interior e Eficiência Energética nas Escolas*, ed. M.R. N.º13. 2010, Lisboa: REHVA.
14. WHO, *Air Quality Guidelines for Europe*, S. Edition, Editor. 2000.
15. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. 2009: Atlanta, USA: ASHRAE.
16. ANSI / ASHRAE Standard 62.1-2007, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, ASHRAE, Editor. 2007: Atlanta, USA.



17. APA, *Qualidade do Ar em Espaços Interiores - Um Guia Técnico*. 2009, Agência Portuguesa do Ambiente (APA).
18. Seppänen, O., *Ventilation, Energy and Indoor Air Quality*. Indoor air, 2002.
19. WHO, *Development of WHO Guidelines for Indoor Air Quality – Report on a Working Group Meeting*. 2006.
20. Valente, J.C., *Referencial de QAI no RSECE*. 2008.
21. Sá, R. *A Eficiência Energética, a Qualidade do Ar e a Climatização nas Escolas*. in *10ª Jornadas de Climatização*. 2010.
22. Silva, M.G.d. *Qualidade do Ar em Edifícios - Onde estamos e para onde vamos*. in *ENERGIA 2020 - Eficiência Energética*. 2010. Campus da Universidade de Lisboa.
23. Krzyzanowski, M. and A. Cohen, *Update of WHO air quality guidelines*. Air quality, atmosphere, and health, 2008.
24. Silva, G.V.A.d., *Estudo de emissões de COVs por materiais usados em interiores de edifícios*, in *Departamento de Química*. 2000, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto: Porto.
25. Meattle, K., *How to Grow Your Own Fresh Air*, T.I.W. spreading, Editor. 2009.
26. Boles, Y.A.Ç.M.A., *Termodinâmica*. 5ª Edição ed.
27. Costa, A.M., *Apontamentos da disciplina Qualidade do ar interior - Universidade de Aveiro*. 2009.
28. Matos, C.R.e.S.V.d., *O Efeito da ventilação natural na qualidade do ar interior e na eficiência energética dos edifícios*. 2009, Universidade de Aveiro.
29. Martins, N., *Apontamentos da disciplina AVAC - Universidade de Aveiro*. 2010.
30. Freitas, L.R.d. *Soluções para ventilação natural ou mecânica*. in *10ª Jornadas de climatização*. 2010. Lisboa.
31. Persily, A.K., *Evaluating Building IAQ and Ventilation with Indoor Carbon Dioxide*, in *ASHRAE TRANSACTIONS*. 1997.
32. Illinois Department of Public Health Guidelines for Indoor Air Quality. *Fact sheet - environment health*. 10/09/2010]; Available from:  
[http://www.idph.state.il.us/envhealth/factsheets/indoorairqualityguide\\_fs.htm](http://www.idph.state.il.us/envhealth/factsheets/indoorairqualityguide_fs.htm).
33. Persily, A.K., *The relationship between indoor air quality and carbon dioxide*, in *International conference on indoor air quality and climate*. 1996.
34. ANSI / ASHRAE Standard 62.1-1989, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. 1989.

35. ADENE, DGEG, and APA, *Intervenção do PQ ao Nível dos edifícios abrangidos pelo RSECE - Vertente QAI*. 2006.
36. Nunes, S. *Enquadramento, Objectivos, Metodologia de intervenção e sustentabilidade*. in *10ª Jornadas de Climatização*. 2010.
37. SSPC. 2010, ASHRAE Standing Standard Project Committee 62.1 (SSPC 62.1)
38. Nicol, F. and M. Wilson. *Adapting to Change: New Thinking on Comfort*. in *Network for Comfort and Energy Use in Buildings*. 2010. London.
39. TRANE. *Using CO<sub>2</sub> for Demand-Controlled Ventilation*. Engineers newsletter 2002 18/04/2010]; Available from: [http://www.trane.com/Commercial/library/vol31\\_3/](http://www.trane.com/Commercial/library/vol31_3/).
40. Olesen, B.W., *The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings*. Energy and Buildings, 2007. 39(7): p. 740-749.
41. ASHRAE, *ASHRAE Handbook of Fundamentals - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. 2009: Atlanta, USA: ASHRAE.
42. Olesen, B.W., O. Seppanen, and A. Boerstra, *Criteria for the indoor environment for energy performance of buildings: A new European standard*. Facilities, 2006. vol: 24(issue: 11/12): p. pages: 445-457.
43. Budaiwi, I.M. and M.S. Al-Homoud, *Effect of ventilation strategies on air contaminant concentrations and energy consumption in buildings*. International Journal of Energy Research, 2001.
44. Djukanovic, R., P. Wargocki, and P.O. Fanger. *Cost-benefit analysis of improved air quality in an office building*. 2002.
45. Mathworks. *MATLAB Documentation*. 2010 11/08/2010]; Available from: <http://www.mathworks.com/>.
46. INETI, *SolTerm - Análise de Desempenho de Sistemas Solares Térmicos e Fotovoltaicos*, 5.1, Editor. 2009.
47. Dasi, H., F. Xiaowei, and T. Shanzhong, *Simulation study of CO<sub>2</sub> based Outdoor Air Rate Control in Public Buildings*. 2006.
48. Rodrigues, A.M., A.C.d. Piedade, and A.M. Braga, *Térmica de Edifícios*, ed. Edição. 2009.
49. Gonçalves, H. and J.M. Graça. *Conceitos bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. 2004.
50. ANSI / ASHRAE Standard 55-2004, *Thermal environmental conditions for human occupancy*. 2004: Atlanta, USA.

51. *Energyplus energy simulation software.* 15/10/2010]; Available from:  
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>.

# Anexo 1 - Comparação de regulamentos e guias pertinentes ao ambiente interior [16]

Enforceable and/or Regulatory Levels							Non-Enforced Guidelines and Reference Levels			
	NAAQS/EPA (Ref. B-4)	OSHA (Ref. B-5)	MAK (Ref. B-2)	Canadian (Ref. B-8)	WHO/Europe (Ref. B-11)	NIOSH (Ref. B-13)	ACGIH (Ref. B-1)			
Carbon dioxide		5000 ppm	5000 ppm 10,000 ppm [1 h]	3500 ppm [L]		5000 ppm 30,000 ppm [15 min]	5000 ppm 30,000 ppm [15 min]			
Carbon monoxide <sup>c</sup>	9 ppm <sup>g</sup> 35 ppm [1 h] <sup>g</sup>	50 ppm	30 ppm 60 ppm [30 min]	11 ppm [8 h] 25 ppm [1 h]	90 ppm [15 min] 50 ppm [30 min] 25 ppm [1 h] 10 ppm [8 h]	35 ppm 200 ppm [C]	25 ppm			
Formaldehyde <sup>h</sup>		0.75 ppm 2 ppm [15 min]	0.3 ppm 1 ppm <sup>i</sup>	0.1 ppm [L] 0.05 ppm [L] <sup>b</sup>	0.1 mg/m <sup>3</sup> (0.081 ppm) [30 min] <sup>p</sup>	0.016 ppm 0.1 ppm [15 min]	0.3 ppm [C]			
Lead	1.5 µg/m <sup>3</sup> [3 months]	0.05 mg/m <sup>3</sup>	0.1 mg/m <sup>3</sup> 1 mg/m <sup>3</sup> [30 min]	Minimize exposure	0.5 µg/m <sup>3</sup> [1 yr]	0.050 mg/m <sup>3</sup>	0.05 mg/m <sup>3</sup>			
Nitrogen dioxide	0.05 ppm [1 yr]	5 ppm [C]	5 ppm 10 ppm [5 min]	0.05 ppm 0.25 ppm [1 h]	0.1 ppm [1 h] 0.02 ppm [1 yr]	1 ppm [15 min]	3 ppm 5 ppm [15 min]			
Ozone	0.12 ppm [1 h] <sup>g</sup> 0.08 ppm	0.1 ppm	j	0.12 ppm [1 h]	0.064 ppm (120 µg/m <sup>3</sup> ) [8 h]	0.1 ppm [C]	0.05 ppm <sup>k</sup> 0.08 ppm <sup>l</sup> 0.1 ppm <sup>m</sup> 0.2 ppm <sup>n</sup>			
Particles <sup>e</sup> <2.5 µm MMAD <sup>d</sup>	15 µg/m <sup>3</sup> [1 yr] <sup>o</sup> 65 µg/m <sup>3</sup> [24 h] <sup>o</sup>	5 mg/m <sup>3</sup>	1.5 mg/m <sup>3</sup> for <4 µm	0.1 mg/m <sup>3</sup> [1 h] 0.040 mg/m <sup>3</sup> [L]			3 mg/m <sup>3</sup> [C]			
Particles <sup>e</sup> <10 µm MMAD <sup>d</sup>	50 µg/m <sup>3</sup> [1 yr] <sup>o</sup> 150 µg/m <sup>3</sup> [24 h] <sup>o</sup>		4 mg/m <sup>3</sup>				10 mg/m <sup>3</sup> [C]			
Radon				800 Bq/m <sup>3</sup> [1 yr]						
Sulfur dioxide	0.03 ppm [1 yr] 0.14 ppm [24 h] <sup>g</sup>	5 ppm	0.5 ppm 1 ppm <sup>i</sup>	0.38 ppm [5 min] 0.019 ppm	0.048 ppm [24 h] 0.012 ppm [1 yr]	2 ppm 5 ppm [15 min]	2 ppm 5 ppm [15 min]			
Total Particles <sup>e</sup>		15 mg/m <sup>3</sup>								

<sup>a</sup> Numbers in brackets [ ] refer to either a ceiling or to averaging times of less than or greater than eight hours (min = minutes; h = hours; y = year; C = ceiling, L = long-term). Where no time is specified, the averaging time is eight hours.

<sup>b</sup> Target level is 0.05 ppm because of its potential carcinogenic effects. Total aldehydes limited to 1 ppm. Although the epidemiological studies conducted to date provide little convincing evidence that formaldehyde is carcinogenic in human populations, because of this potential, indoor levels should be reduced as much as possible.

<sup>c</sup> As one example regarding the use of values in this table, readers should consider the applicability of carbon monoxide concentrations. The concentrations considered acceptable for nonindustrial, as opposed to industrial, exposure are substantially lower. These lower concentrations (in other words, the ambient air quality standards, which are required to consider populations at highest risk) are set to protect the most sensitive subpopulation, individuals with pre-existing heart conditions.

<sup>d</sup> MMAD = mass median aerodynamic diameter in microns (micrometers). Less than 3.0 µm is considered respirable; less than 10 µm is considered inhalable.

<sup>e</sup> Nuisance particles not otherwise classified (PNOC), not known to contain significant amounts of asbestos, lead, crystalline silica, known carcinogens, or other particles known to cause significant adverse health effects.

<sup>f</sup> See Table B-2 for the U.S. EPA guideline.

<sup>g</sup> Not to be exceeded more than once per year.

<sup>h</sup> The U.S. Department of Housing and Urban Development adopted regulations concerning formaldehyde emissions from plywood and particleboard intended to limit the airborne concentration of formaldehyde in manufactured homes to 0.4 ppm. (24 CFR Part 3280, HUD Manufactured Home Construction and Safety Standards).

<sup>i</sup> Never to be exceeded.

<sup>j</sup> Carcinogen, no maximum values established.

<sup>k</sup> TLV<sup>®</sup> for heavy work.

<sup>l</sup> TLV<sup>®</sup> for moderate work.

<sup>m</sup> TLV<sup>®</sup> for light work.

<sup>n</sup> TLV<sup>®</sup> for heavy, moderate, or light workloads (less than or equal to two hours).

<sup>o</sup> 62FR38652 - 38760, July 16, 1997.

<sup>p</sup> Epidemiological studies suggest a causal relationship between exposure to formaldehyde and nasopharyngeal cancer, although the conclusion is tempered by the small numbers of observed and expected cases. There are also epidemiological observations of an association between relatively high occupational exposures to formaldehyde and sinonasal cancer.

The substances listed in Table B-2 are common air contaminants of concern in nonindustrial environments. The target concentrations that have been set or proposed by various national or international organizations concerned with health and comfort effects of outdoor and indoor air are listed for reference only. The table is not inclusive of all contaminants in indoor air, and achieving the target indoor concentrations for all of the listed substances does not ensure freedom from sensory irritation or from all adverse health effects for all occupants. In addition to indoor contaminant levels, the acceptability of indoor air also involves thermal conditions, indoor moisture levels as they impact microbial growth, and other indoor environmental factors. ASHRAE is not selecting or recommending default concentrations.

Health or comfort effects and exposure periods that are the basis for the guideline levels are listed in the “comments” column. For design, the goal should be to meet the guideline levels continuously during occupancy because people spend the great majority of their time indoors.

Users of this table should recognize that unlisted noxious contaminants can also cause unacceptable IAQ with regard to comfort (sensory irritation), odors, and health. When such contaminants are known or might reasonably be expected to be present, selection of an acceptable concentration and exposure may require reference to other guidelines or a review and evaluation of relevant toxicological and epidemiological literature. (Table B-2 summarizes some of this literature.)

**TABLE B-2 Concentration of Interest for Selected Contaminants**

(Note: References numbers that are followed by [c] and [m] list the concentrations of interest [c] and measurement methods [m].)

(Note: The user of any value in this table should take into account the purpose for which it was adopted and the means by which it was developed.)

Contaminant	Sources	Concentrations of Interest	Comments	References
Carbon Monoxide (CO)	Leaking vented combustion appliances Unvented combustion appliances Parking garages Outdoor air	9 ppm (8 h)	Based on effects on persons with coronary artery disease, average exposure for eight hours. Sustained indoor concentrations exceeding outdoor concentrations may merit further investigation. Many carbon monoxide measuring instruments have limited accuracy at low levels. Sources—burning of gasoline, natural gas, coal, oil, etc. Health effects—reduces ability of blood to bring oxygen to body cells and tissues; cells and tissues need oxygen to work. Carbon monoxide may be particularly hazardous to people who have heart or circulatory problems and people who have damaged lungs or breathing passages.	B-4 [c] B-9 [m]
Formaldehyde (HCHO)	Pressed-wood products Furniture and furnishings	0.1 mg/m <sup>3</sup> (0.081 ppm) (30 min)	Based on irritation of sensitive people, 30-minute exposure (WHO).	B-11 [c] B-9, 26 [m]
		27 ppb (8 h)	Established as a never-to-exceed guideline to avoid irritant effects in sensitive individuals. Does not protect against formaldehyde's potential carcinogenicity (California Air Resources Board).	B-16
		76 ppb (1 h) 27 ppb (8 h)	Based on the current acute one-hour reference exposure level (REL) of 76 ppb (94 µg/m <sup>3</sup> ), an exposure level of 27 ppb (33 µg/m <sup>3</sup> ) is derived for an 8-hour exposure period (Cal-EPA, OEHHA).	B-36, 41
			Health effects—Acute and chronic inhalation exposure to formaldehyde in humans can result in eye, nose, and throat irritation, respiratory symptoms, exacerbation of asthma, and sensitization. Human studies have reported an association between formaldehyde exposure and lung and nasopharyngeal cancer. In 2004, the International Agency for Research on Cancer (IARC) concluded that “ <i>formaldehyde is carcinogenic to humans (Group 1)</i> ”, on the basis of <i>sufficient evidence</i> in humans and <i>sufficient evidence</i> in experimental animals.”	B-19, 20, 36, 42



Contaminant	Sources	Concentrations of Interest	Comments	References
Lead (Pb)	Paint dust Outdoor air	1.5 µg/m <sup>3</sup>	Based on adverse effects on neuropsychological functioning of children, average exposure for three months (WHO: 0.5-1 µg/m <sup>3</sup> for 1 year). Sources—leaded gasoline (being phased out), paint (houses, cars), smelters (metal refineries), manufacture of lead storage batteries. Health effects—brain and other nervous system damage; children are at special risk. Some lead-containing chemicals cause cancer in animals. Lead causes digestive and other health problems. Environmental effects—Lead can harm wildlife.	B-4 [c] B-4 [m] B-18
Nitrogen Dioxide (NO <sub>2</sub> )	Leaking vented combustion appliances Unvented combustion appliances Outdoor air	100 µg/m <sup>3</sup>	Based on providing protection against adverse respiratory effects, average exposure for one year. Sources—burning of gasoline, natural gas, coal, oil, etc. Cars are an important source of NO <sub>2</sub> outdoors and cooking and water- and space-heating devices are important sources indoors. Health effects—lung damage, illnesses of breathing passages and lungs (respiratory system). Environmental effects—Nitrogen dioxide is a component of acid rain (acid aerosols), which can damage trees and lakes. Acid aerosols can reduce visibility. Property damage—Acid aerosols can eat away stone used on buildings, statues, monuments, etc.	B-4 [c] B-9 [m] B-18
		470 µg/m <sup>3</sup>	24-hour average to prevent high exposures during use of combustion appliances such as space-heating devices and gas stoves.	B-43
Odors	Occupants VOC sources (including fungal sources such as mold) Cooking, food processing, sewage, biowaste facilities, etc.	Predicted (or measured) acceptability to 80% or more of occupants or visitors	CO <sub>2</sub> concentration can be used as a surrogate for occupant odors (odorous bioeffluents). See Appendix C for a discussion of indoor CO <sub>2</sub> levels and ventilation rates. For sources other than people, source control is recommended.	B-12, 24, 29, 30 [c] B-9 (CO <sub>2</sub> ), B-15 (odor) [m]
Ozone (O <sub>3</sub> )	Electrostatic appliances Office machines Ozone generators Outdoor air	100 µg/m <sup>3</sup> (50 ppb)	Based on 25% increase in symptom exacerbations among adults or asthmatics (normal activity), eight-hour exposure (WHO); continuous exposure (FDA). Ozone present at levels below the concentration of interest may contribute to the degradation of indoor air quality directly and by reacting with other contaminants in the indoor space. Ground-level ozone is the principal component of smog. Sources—outdoors, from chemical reaction of pollutants, VOCs, and NO <sub>x</sub> ; indoors, from photocopiers, laser printers, ozone generators, electrostatic precipitators, and some other air cleaners. Health effects—breathing problems, reduced lung function, asthma, irritated eyes, stuffy nose, reduced resistance to colds and other infections. May speed up aging of lung tissue. Environmental effects—Outdoors, ozone can damage plants and trees; smog can cause reduced visibility. Property damage—Indoors and outdoors, ozone damages natural and synthetic rubbers, plastics, fabrics, etc.	B-6, 11 [c] B-6 [m] B-18
Particles (PM <sub>2.5</sub> )	Combustion products, cooking, candles, incense, resuspension, and outdoor air	15 µg/m <sup>3</sup>		B-4

Contaminant	Sources	Concentrations of Interest	Comments	References
Particles (PM <sub>10</sub> )	Dust Smoke Deteriorating materials Outdoor air	50 µg/m <sup>3</sup>	Based on protecting against respiratory morbidity in the general population and avoiding exacerbation of asthma, average exposure for one year, no carcinogens. Indoor concentrations are normally lower; guideline level may lead to unacceptable deposition of "dust." Sources—burning of wood, diesel, and other fuels; industrial plants; agriculture (plowing, burning off fields); unpaved roads. Health effects—nose and throat irritation, lung damage, bronchitis, early death. Environmental effects—Particulates are the main source of haze that reduces visibility. Property damage—Ashes, soot, smoke, and dust can dirty and discolor structures and other property, including clothes and furniture.	B-4 [c] B-4 [m]          B-18
Radon (Rn)	Soil gas	4 pCi/L <sup>a</sup>	Based on lung cancer, average exposure for one year.	B-7 [c,m] B-10 [m]
Sulfur Dioxide (SO <sub>2</sub> )	Unvented space heaters (kerosene) Outdoor air	80 µg/m <sup>3</sup>	Based on protecting against respiratory morbidity in the general population and avoiding exacerbation of asthma, average exposure for one year (WHO: 50 µg/m <sup>3</sup> if with PM). Source—burning of coal and oil, especially high-sulfur coal from the eastern United States; industrial processes (paper, metals). Health effects—breathing problems; may cause permanent damage to lungs. Environmental effects—SO <sub>2</sub> is a component of acid rain (acid aerosols), which can damage trees and lakes. Acid aerosols can also reduce visibility. Property damage—Acid aerosols can eat away stone used in buildings, statues, monuments, etc.	B-4 [c] B-4 [m]          B-18
Total Volatile Organic Compounds (TVOCs)	New building materials and furnishings Consumable products Maintenance materials Outdoor air	Precise guidance on TVOC concentrations cannot be given	A variety of definitions of TVOC have been employed in the past. Reference B-27 contains a specific definition that reflects recent thinking on the subject. There is insufficient evidence that TVOC measurements can be used to predict health or comfort effects. In addition, odor and irritation responses to organic compounds are highly variable. Furthermore, no single method currently in use measures all organic compounds that may be of interest. Therefore, some investigators have reported the total of all measured VOCs as the SumVOC in order to make explicit that the reported value does not represent the total of all VOCs present. Some of the references included here use this method for presenting VOC measurement results. Setting target concentrations for TVOCs is not recommended. Setting target concentrations for specific VOCs of concern is preferred.	B-9 [m] B-14, 26-28, 35, 38
Volatile Organic Compounds (VOCs)	New building materials and furnishings Consumable products Maintenance materials Outdoor air	Must be determined for each individual compound	Individual volatile organic compounds may be contaminants of concern in the application of the IAQ Procedure. Concentrations of concern range from less than 1 part per billion (ppb) for some very toxic compounds or for compounds having very low odor thresholds up to concentrations several orders of magnitude higher. Not all compounds can be identified, and toxicological data are incomplete for many compounds.	B-22-26, 28, 44, 45, 46 [c] B-9, 10, 21 [m] B-11, 15, 37, 39, 40

<sup>a</sup> The US EPA has promulgated a guideline value of 4 pCi/L indoor concentration. This is not a regulatory value but an action level where mitigation is recommended if the value is exceeded in long-term tests.

#### Conversion Factors<sup>B-17</sup>

Parts per million and mass per unit volume:

Measurements of indoor airborne concentrations of substances are generally converted to standard conditions of 77°F (25°C) and 29.92 in. Hg (101.325 kPa) pressure. Vapors or gases are often expressed in parts per million (ppm) by volume or in mass per unit volume. Concentrations in ppm by volume can be converted to mass per unit volume values as follows:

$$\text{ppm} \times \text{molecular weight}/24.450 = \text{mg/L}$$

$$\text{ppm} \times \text{molecular weight}/0.02445 = \mu\text{g/m}^3$$

$$\text{ppm} \times \text{molecular weight}/24.45 = \text{mg/m}^3$$

$$\text{ppm} \times \text{molecular weight} \times 28.3/24,450 = \text{mg/ft}^3$$

### Anexo 3 - Taxas de ventilação mínimas na zona respirável [16]

Occupancy Category	People Outdoor Air Rate $R_p$		Area Outdoor Air Rate $R_a$		Notes	Default Values			Air Class
						Occupant Density (see Note 4)	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)		
	cfm/person	L/s·person	cfm/ft <sup>2</sup>	L/s·m <sup>2</sup>		#/1000 ft <sup>2</sup> or #/100 m <sup>2</sup>	cfm/person	L/s·person	
Correctional Facilities									
Cell	5	2.5	0.12	0.6		25	10	4.9	2
Dayroom	5	2.5	0.06	0.3		30	7	3.5	1
Guard stations	5	2.5	0.06	0.3		15	9	4.5	1
Booking/waiting	7.5	3.8	0.06	0.3		50	9	4.4	2
Educational Facilities									
Daycare (through age 4)	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
Daycare sickroom	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	3
Classrooms (ages 5–8)	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4	1
Classrooms (age 9 plus)	10	5	0.12	0.6		35	13	6.7	1
Lecture classroom	7.5	3.8	0.06	0.3		65	8	4.3	1
Lecture hall (fixed seats)	7.5	3.8	0.06	0.3		150	8	4.0	1
Art classroom	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5	2
Science laboratories	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
University/college laboratories	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
Wood/metal shop	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5	2
Computer lab	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4	1
Media center	10	5	0.12	0.6	A	25	15	7.4	1
Music/theater/dance	10	5	0.06	0.3		35	12	5.9	1
Multi-use assembly	7.5	3.8	0.06	0.3		100	8	4.1	1
Food and Beverage Service									
Restaurant dining rooms	7.5	3.8	0.18	0.9		70	10	5.1	2
Cafeteria/fast-food dining	7.5	3.8	0.18	0.9		100	9	4.7	2
Bars, cocktail lounges	7.5	3.8	0.18	0.9		100	9	4.7	2
General									
Break rooms	5	2.5	0.06	0.3		25	10	5.1	1
Coffee stations	5	2.5	0.06	0.3		20	11	5.5	1
Conference/meeting	5	2.5	0.06	0.3		50	6	3.1	1
Corridors	—	—	0.06	0.3		—			1
Storage rooms	—	—	0.12	0.6	B	—			1
Hotels, Motels, Resorts, Dormitories									
Bedroom/living room	5	2.5	0.06	0.3		10	11	5.5	1
Barracks sleeping areas	5	2.5	0.06	0.3		20	8	4.0	1
Laundry rooms, central	5	2.5	0.12	0.6		10	17	8.5	2
Laundry rooms within dwelling units	5	2.5	0.12	0.6		10	17	8.5	1
Lobbies/prefunction	7.5	3.8	0.06	0.3		30	10	4.8	1
Multipurpose assembly	5	2.5	0.06	0.3		120	6	2.8	1



Occupancy Category	People Outdoor Air Rate $R_p$		Area Outdoor Air Rate $R_a$		Notes	Default Values			Air Class
						Occupant Density (see Note 4)	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)		
	cfm/person	L/s·person	cfm/ft <sup>2</sup>	L/s·m <sup>2</sup>		#/1000 ft <sup>2</sup> or #/100 m <sup>2</sup>	cfm/person	L/s·person	
Office Buildings									
Office space	5	2.5	0.06	0.3		5	17	8.5	1
Reception areas	5	2.5	0.06	0.3		30	7	3.5	1
Telephone/data entry	5	2.5	0.06	0.3		60	6	3.0	1
Main entry lobbies	5	2.5	0.06	0.3		10	11	5.5	1
Miscellaneous Spaces									
Bank vaults/safe deposit	5	2.5	0.06	0.3		5	17	8.5	2
Computer (not printing)	5	2.5	0.06	0.3		4	20	10.0	1
Electrical equipment rooms	—	—	0.06	0.3	B	—			1
Elevator machine rooms	—	—	0.12	0.6	B	—			1
Pharmacy (prep. area)	5	2.5	0.18	0.9		10	23	11.5	2
Photo studios	5	2.5	0.12	0.6		10	17	8.5	1
Shipping/receiving	—	—	0.12	0.6	B	—			1
Telephone closets	—	—	0.00	0.0		—			1
Transportation waiting	7.5	3.8	0.06	0.3		100	8	4.1	1
Warehouses	—	—	0.06	0.3	B	—			2
Public Assembly Spaces									
Auditorium seating area	5	2.5	0.06	0.3		150	5	2.7	1
Places of religious worship	5	2.5	0.06	0.3		120	6	2.8	1
Courtrooms	5	2.5	0.06	0.3		70	6	2.9	1
Legislative chambers	5	2.5	0.06	0.3		50	6	3.1	1
Libraries	5	2.5	0.12	0.6		10	17	8.5	1
Lobbies	5	2.5	0.06	0.3		150	5	2.7	1
Museums (children’s)	7.5	3.8	0.12	0.6		40	11	5.3	1
Museums/galleries	7.5	3.8	0.06	0.3		40	9	4.6	1
Residential									
Dwelling unit	5	2.5	0.06	0.3	F,G	F			1
Common corridors	—	—	0.06	0.3					1
Retail									
Sales (except as below)	7.5	3.8	0.12	0.6		15	16	7.8	2
Mall common areas	7.5	3.8	0.06	0.3		40	9	4.6	1
Barbershop	7.5	3.8	0.06	0.3		25	10	5.0	2
Beauty and nail salons	20	10	0.12	0.6		25	25	12.4	2
Pet shops (animal areas)	7.5	3.8	0.18	0.9		10	26	12.8	2
Supermarket	7.5	3.8	0.06	0.3		8	15	7.6	1
Coin-operated laundries	7.5	3.8	0.06	0.3		20	11	5.3	2

Occupancy Category	People Outdoor Air Rate		Area Outdoor Air Rate		Notes	Default Values			Air Class
	$R_p$		$R_a$			Occupant Density (see Note 4)	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)		
	cfm/person	L/s-person	cfm/ft <sup>2</sup>	L/s·m <sup>2</sup>		#/1000 ft <sup>2</sup> or #/100 m <sup>2</sup>	cfm/person	L/s-person	
Sports and Entertainment									
Sports arena (play area)	—	—	0.30	1.5	E	—			1
Gym, stadium (play area)	—	—	0.30	1.5		30			2
Spectator areas	7.5	3.8	0.06	0.3		150	8	4.0	1
Swimming (pool & deck)	—	—	0.48	2.4	C	—			2
Disco/dance floors	20	10	0.06	0.3		100	21	10.3	1
Health club/aerobics room	20	10	0.06	0.3		40	22	10.8	2
Health club/weight rooms	20	10	0.06	0.3		10	26	13.0	2
Bowling alley (seating)	10	5	0.12	0.6		40	13	6.5	1
Gambling casinos	7.5	3.8	0.18	0.9		120	9	4.6	1
Game arcades	7.5	3.8	0.18	0.9		20	17	8.3	1
Stages, studios	10	5	0.06	0.3	D	70	11	5.4	1

**GENERAL NOTES FOR TABLE 6-1**

- 1 **Related requirements:** The rates in this table are based on all other applicable requirements of this standard being met.
- 2 **Smoking:** This table applies to no-smoking areas. Rates for smoking-permitted spaces must be determined using other methods. See Section 6.2.9 for ventilation requirements in smoking areas.
- 3 **Air density:** Volumetric airflow rates are based on an air density of 0.075 lb<sub>da</sub>/ft<sup>3</sup> (1.2 kg<sub>da</sub>/m<sup>3</sup>), which corresponds to dry air at a barometric pressure of 1 atm (101.3 kPa) and an air temperature of 70°F (21°C). Rates may be adjusted for actual density but such adjustment is not required for compliance with this standard.
- 4 **Default occupant density:** The default occupant density shall be used when actual occupant density is not known.
- 5 **Default combined outdoor air rate (per person):** This rate is based on the default occupant density.
- 6 **Unlisted occupancies:** If the occupancy category for a proposed space or zone is not listed, the requirements for the listed occupancy category that is most similar in terms of occupant density, activities and building construction shall be used.
- 7 **Health-care facilities:** Rates shall be determined in accordance with Appendix E.

**ITEM-SPECIFIC NOTES FOR TABLE 6-1**

- A For high school and college libraries, use values shown for Public Assembly Spaces—Libraries.
- B Rate may not be sufficient when stored materials include those having potentially harmful emissions.
- C Rate does not allow for humidity control. Additional ventilation or dehumidification may be required to remove moisture.
- D Rate does not include special exhaust for stage effects, e.g., dry ice vapors, smoke.
- E When combustion equipment is intended to be used on the playing surface, additional dilution ventilation and/or source control shall be provided.
- F Default occupancy for dwelling units shall be two persons for studio and one-bedroom units, with one additional person for each additional bedroom.
- G Air from one residential dwelling shall not be recirculated or transferred to any other space outside of that dwelling.

## Anexo 4 - Eficácia da distribuição do ar na zona [16]

Air Distribution Configuration	$E_z$
Ceiling supply of cool air.	1.0
Ceiling supply of warm air and floor return.	1.0
Ceiling supply of warm air 15°F (8°C) or more above space temperature and ceiling return.	0.8
Ceiling supply of warm air less than 15°F (8°C) above space temperature and ceiling return provided that the 150 fpm (0.8 m/s) supply air jet reaches to within 4.5 ft (1.4 m) of floor level. <i>Note:</i> For lower velocity supply air, $E_z = 0.8$ .	1.0
Floor supply of cool air and ceiling return provided that the 150 fpm (0.8 m/s) supply jet reaches 4.5 ft (1.4 m) or more above the floor. <i>Note:</i> Most underfloor air distribution systems comply with this proviso.	1.0
Floor supply of cool air and ceiling return, provided low-velocity displacement ventilation achieves unidirectional flow and thermal stratification.	1.2
Floor supply of warm air and floor return.	1.0
Floor supply of warm air and ceiling return.	0.7
Makeup supply drawn in on the opposite side of the room from the exhaust and/or return.	0.8
Makeup supply drawn in near to the exhaust and/or return location.	0.5

1. "Cool air" is air cooler than space temperature.

2. "Warm air" is air warmer than space temperature.

3. "Ceiling" includes any point above the *breathing zone*.

4. "Floor" includes any point below the *breathing zone*.

5. As an alternative to using the above values,  $E_z$  may be regarded as equal to air change effectiveness determined in accordance with ANSI/ASHRAE Standard 129<sup>16</sup> for all air distribution configurations except unidirectional flow.

## Anexo 5 - Padrões de referência de utilização de edifícios [2]

### Clubes desportivos sem piscina

Perfis variáveis de acordo com os valores das tabelas	
	<b>Densidades</b>
Ocupação	7 m <sup>2</sup> /Ocupante
Iluminação	-----
Equipamento	1 W/m <sup>2</sup>

Perfis Constantes		
	<b>Densidade</b>	<b>N.º Horas funcionamento</b>
<b>Iluminação Exterior</b>	10 000 lx (1000-10000 lx 10000)	5400

	% de Ocupação		
horas	Segunda a Sexta	Sábados	Domingos e Feriados
0h as 1h	0	0	0
1h as 2h	0	0	0
2h as 3h	0	0	0
3h as 4h	0	0	0
4h as 5h	0	0	0
5h as 6h	0	0	0
6h as 7h	0	0	0
7h as 8h	15	0	0
8h as 9h	35	0	0
9h as 10h	40	0	0
10h as 11h	55	0	0
11h as 12h	55	0	0
12h as 13h	40	0	0
13h as 14h	100	0	0
14h as 15h	100	0	0
15h as 16h	100	0	0
16h as 17h	100	0	0
17h as 18h	75	0	0
18h as 19h	50	0	0
19h as 20h	50	0	0
20h as 21h	50	0	0
21h as 22h	35	0	0
22h as 23h	30	0	0
23h as 24h	0	0	0

## Escritórios

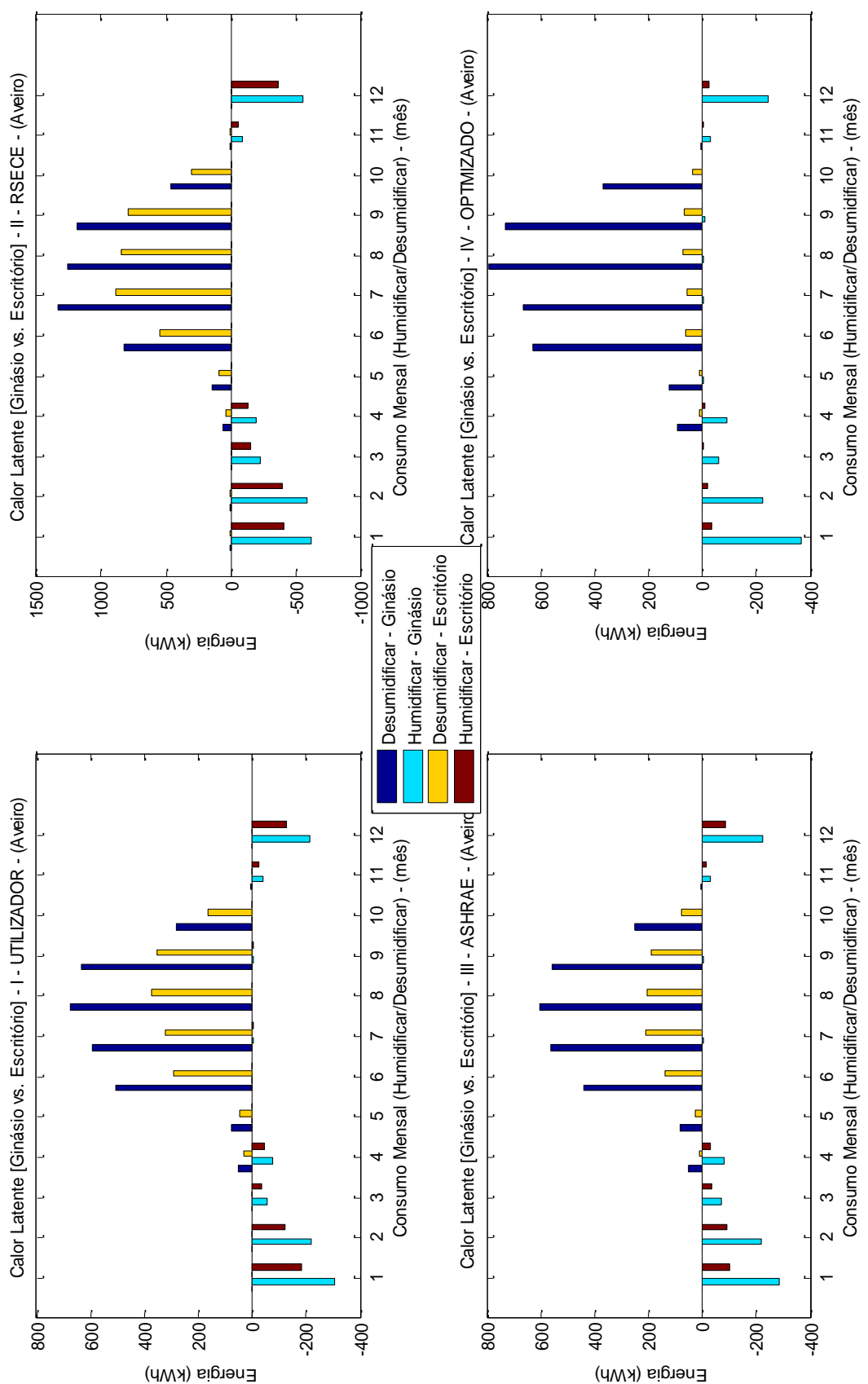
Perfis variáveis de acordo com os valores das tabelas	
	Densidades
Ocupação	15 m <sup>2</sup> /Ocupante
Iluminação	-----
Equipamento	15 W/m <sup>2</sup>

Perfis Constantes		
	Densidade	N.º Horas funcionamento
Iluminação Exterior	-----	5400
Cozinhas	Densidades	N.º Horas funcionamento
Iluminação	-----	1560
Equipamento	250 W/m <sup>2</sup>	
Ventilação	8 W/m <sup>2</sup>	
Estacionamento	Densidade	N.º Horas funcionamento
Iluminação	-----	2730
Equipamento	2 W/m <sup>2</sup>	
Ventilação	8 W/m <sup>2</sup>	

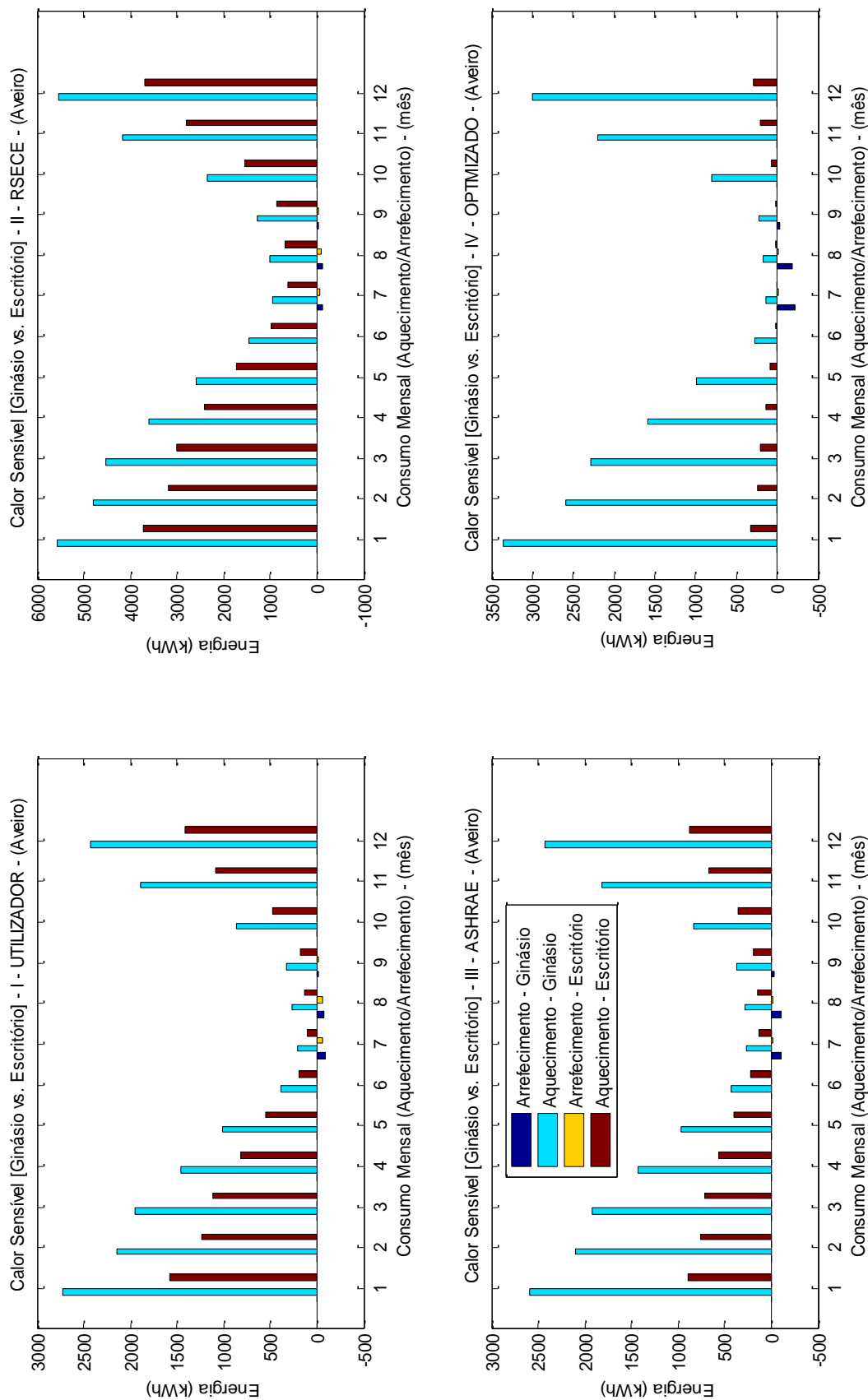
horas	% de Ocupação	
	Segunda a sexta	Fins de semana
0h as 1h	0	0
1h as 2h	0	0
2h as 3h	0	0
3h as 4h	0	0
4h as 5h	0	0
5h as 6h	0	0
6h as 7h	10	0
7h as 8h	20	0
8h as 9 h	50	0
9h as 10h	90	0
10h as 11h	100	0
11h as 12h	100	0
12h as 13h	50	0
13h as 14h	70	0
14h as 15h	90	0
15h as 16h	100	0
16h as 17h	80	0
17h as 18h	50	0
18h as 19h	20	0
19h as 20h	10	0
20h as 21h	0	0
21h as 22h	0	0
22h as 23h	0	0
23h as 24h	0	0

Anexo 6 - Necessidades energéticas mensais simuladas

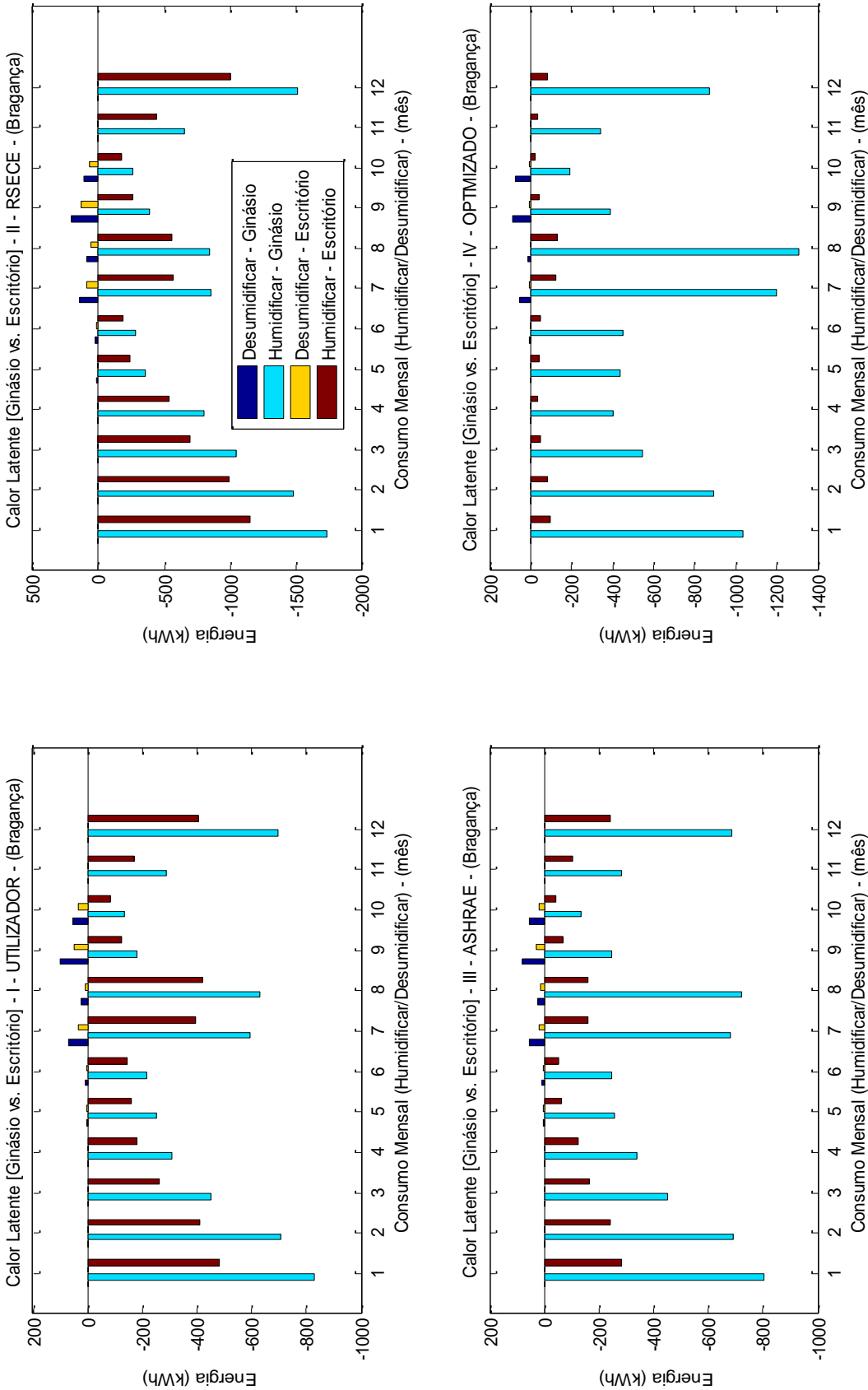
Energia requerida pelo calor latente para Aveiro



Energia requerida pelo calor sensível para Aveiro

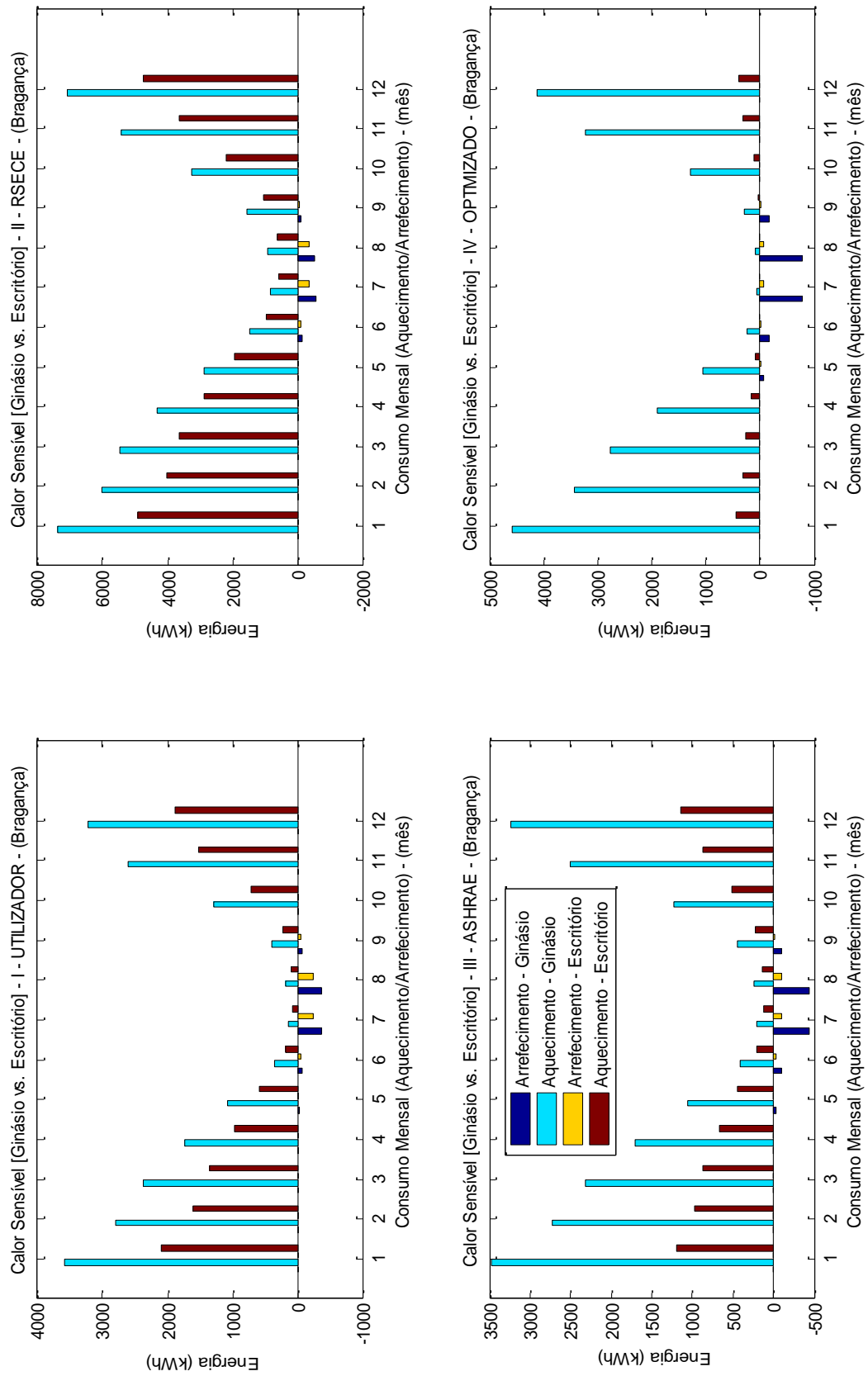


Energia requerida pelo calor latente para Bragança

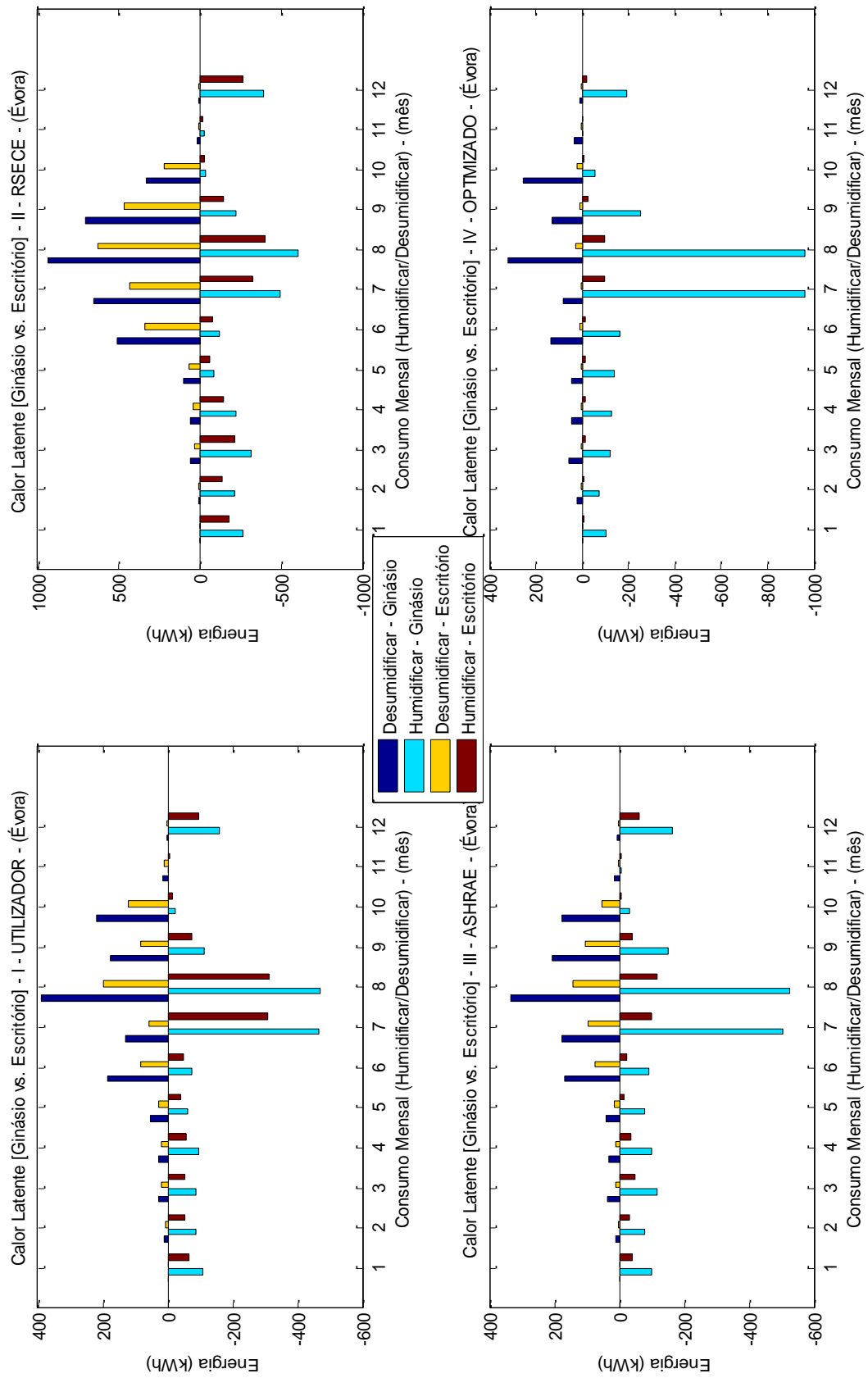




## Energia requerida pelo calor sensível para Bragança



## Energia requerida pelo calor latente para Évora



Energia requerida pelo calor sensível para Évora

